



# Universidad de Cuenca

Facultad de Ingeniería

## Carrera de Ingeniería Civil

Dosificación óptima en pavimento flexible de asfalto y caucho reciclado  
utilizando materiales de la región.

Trabajo de titulación previo a la obtención del título de Ingeniero Civil

### AUTORES:

Jordi René Orellana Orellana

C.I: 0104456124

Jason Estevan Solano Mosquera

C.I: 0105518260

### DIRECTOR:

Ing. Jaime Asdrúbal Bojorque Ñeguez, PhD

C.I: 0102857885

Cuenca, Ecuador

17-10 -2019

## **Resumen**

El presente trabajo de titulación se basa en el estudio de la incorporación por vía húmeda de polvo de caucho proveniente de neumáticos reciclados como parte del betún en mezclas asfálticas. Esto con el fin de dar uso a los neumáticos desechados y también mejorar el comportamiento mecánico de las mezclas asfálticas.

La falta de métodos de reciclaje de neumáticos en el país y la falta de antecedentes en la región acerca del uso de neumáticos reciclados. Adicionalmente, la caracterización de los materiales de la región empleados, el diseño a seguir y el estudio de las propiedades mecánicas de las mezclas asfálticas convencionales y modificadas, representan la problemática de la presente investigación.

El método para el diseño de las mezclas tanto convencionales como modificadas es el método Marshall, mediante el cual se evaluaron las propiedades mecánicas de las mezclas asfálticas. Para la mezcla convencional se empleó el 5, 5.5, 6, 6.5 y 7% de asfalto, mientras que para el diseño de mezclas modificadas se añadió el 10, 15 y 20% de polvo de caucho reciclado en relación al peso del bitumen a las mezclas convencionales. Se utilizó la Norma Ecuatoriana de la Vialidad (NEVI-12) para verificar que las propiedades obtenidas de cada muestra cumplan las especificaciones. De los resultados obtenidos a través de los ensayos realizados a 68 diferentes muestras (60 para ensayo Marshall y 8 para ensayo de abrasión) se tiene que la mezcla con el 6.56% de asfalto y con 15% de caucho cumple las especificaciones necesarias para ser considerada apta para la fabricación de pavimentos. Con lo que se establece un punto de partida para posteriores investigaciones sobre los beneficios de la incorporación del polvo de caucho, proveniente de un proceso de reciclaje, a las mezclas asfálticas y su aplicabilidad en la región.

## **Palabras Clave**

Betún. Propiedades Marshall. Método RICE. Densidad Bulk. Polvo de caucho. Abrasión. Neumático. Estabilidad. Flujo.

## **Abstract**

This investigation study is based on the wet incorporation of rubber dust from recycled tires as part of bitumen in asphalt mixtures. This to make use of discarded tires and also improve the mechanical behavior of asphalt mixtures.

The lack of tire recycling methods in the country has led to a poor amount of knowledge in the region in terms of the use of recycled tires. Additionally, the characterization of the materials used in the region, the design to be followed and the study of the mechanical properties of conventional and modified asphalt mixtures, represent the problem in the present investigation.

The method of design for both conventional and modified mixtures is the Marshall method, by which the mechanical properties of asphalt mixtures were evaluated. For the conventional mixture, 5, 5.5, 6, 6.5 and 7% asphalt were used, while for the design of modified mixtures 10, 15 and 20% recycled rubber powder was added in relation to the weight of the bitumen at conventional mixtures. The Norma Ecuatoriana de Vialidad (NEVI-12) was used to verify that the properties obtained from each sample met the specifications. From the results obtained through the tests carried out on 68 different samples (60 for Marshall test and 8 for abrasion test), the mixture with 6.56% asphalt and with 15% rubber meet the necessary specification to be considered suitable for the manufacture of pavements. As a result, a starting point is established for further research on the benefits of the incorporation of rubber dust from a recycling process to asphalt mixtures and their applicability in the region.

## **Keywords**

Bitumen. Marshall properties. RICE method. Bulk density. Rubber dust. Abrasion. Tire. Stability. Flow.

## Contenido

1. Introducción.....	17
1.1. Justificación.....	18
1.2. Objetivos .....	19
1.2.1. Objetivo General .....	19
1.2.2. Objetivos Específicos .....	19
2. Marco Teórico.....	20
2.1. Pavimento.....	20
2.1.1. Tipos de Pavimento .....	20
2.1.2. Estructura del Pavimento Flexible.....	21
2.2. Mezclas Asfálticas .....	23
2.2.1. Mezclas Asfálticas en Caliente.....	23
2.2.2. Características y Comportamiento de la Mezcla .....	33
2.2.3. Propiedades Consideradas en el Diseño de Mezclas .....	36
2.3. Mezclas Asfálticas en Caliente con Incorporación de Polvo de Caucho de Neumáticos Fuera de Uso.....	42
2.3.1. Polvo de Caucho.....	42
3. Métodos de Ensayo y Control.....	53
3.1. Materiales Constituyentes .....	53
3.1.1. Áridos .....	53
3.1.2. Cemento Asfáltico .....	55
3.1.3. Grano de Caucho Reciclado (GCR) .....	57
3.2. Diseño de Mezclas Asfálticas en Caliente .....	58
3.2.1. Mezclas Asfálticas Convencionales .....	58
3.2.2. Mezclas Asfálticas con Incorporación de Polvo de Caucho por Vía Húmeda.	59
3.2.3. Procedimiento para la Confección de Probetas .....	59
3.3. Caracterización de Mezclas Asfálticas.....	63
3.3.1. Método Marshall .....	63
3.3.2. Ensayo RICE .....	63
3.3.3. Ensayo de Abrasión mediante el Método de la Máquina de los Ángeles.....	63
3.4. Trabajo de Laboratorio.....	63
3.4.1. Áridos .....	63
3.4.2. Betún Asfáltico .....	74
3.4.3. Polvo de Caucho.....	74

3.4.4.	Mezclas Asfálticas .....	74
4.	Análisis e Interpretación de Resultados .....	79
4.1.	Caracterización de los Materiales .....	79
4.1.1.	Caracterización de los Agregados .....	79
4.1.2.	Caracterización del Betún Asfáltico .....	86
4.1.3.	Caracterización del Caucho Reciclado .....	87
4.2.	Diseño Marshall de Mezclas Asfálticas .....	88
4.2.1.	Ensayo de Gravedad Específica Teórica Máxima (Gmm) .....	88
4.2.2.	Diseño Marshall: Pavimento Convencional .....	89
4.2.3.	Diseño Marshall: Pavimento Modificado con GCR .....	92
4.3.	Ensayo de Abrasión .....	103
4.4.	Análisis de Precios Unitario .....	103
	Conclusiones y Recomendaciones .....	108
	Conclusiones .....	108
	Recomendaciones .....	109
	Referencias .....	111
	Anexos .....	116

## Índice de Tablas

Tabla 1. Causas y Efectos de Inestabilidad en el Pavimento. (Asphalt Institute, 2001) .....	37
Tabla 2. Causas y Efectos de la Durabilidad. (Asphalt Institute, 2001).....	38
Tabla 3. Causas y Efectos de la Permeabilidad. (Asphalt Institute, 2001).....	39
Tabla 4. Causas y Efectos de Problemas en la Trabajabilidad. (Asphalt Institute, 2001) .....	40
Tabla 5. Causas y Efectos de la Mala Resistencia a la Fatiga. (Asphalt Institute, 2001) .....	41
Tabla 6. Causas y Efectos de Poca Resistencia al Deslizamiento. (Asphalt Institute, 2001).....	42
Tabla 7. Requisitos de Graduación para Agregados en Mezclas Asfálticas Marshall. (Instituto Ecuatoriano de Vialidad, 2012).....	54
Tabla 8. Propiedades de Origen Requeridas para Agregados Gruesos en Mezclas Asfálticas Densas. (Instituto Ecuatoriano de Vialidad, 2012).....	54
Tabla 9. Granulometría Utilizada. ....	55
Tabla 10. Requisitos para Asfalto Cemento gradual Viscosidad a 60 °C a Base de Asfalto Original. (Instituto Ecuatoriano de Normalización, 2010).....	56
Tabla 11. Requerimientos Físicos para las Mezclas de Asfalto-Caucho. (Instituto Ecuatoriano de Normalización, 2013) .....	56
Tabla 12. Características Físicas del Grano Reciclado de Caucho. (Instituto Nacional de Vías, 2013).....	57
Tabla 13. Tamaño de Grano de Caucho. (Instituto Nacional de Vías, 2013).....	57
Tabla 14. Especificaciones para Ensayo de Proctor Modificado Método "C". (Das, 2013).....	73
Tabla 15. Humedad del Árido. Tabla de Datos y Resultados. ....	79
Tabla 16. Datos y Resultados: Ensayo Granulométrico de los Agregados. ....	80
Tabla 17. Tamaño de Grano para Mezclas Marshall. (Instituto Ecuatoriano de Vialidad, 2012) .....	81
Tabla 18. Datos y Resultados: Ensayo de Resistencia a la Abrasión o Desgaste.....	82
Tabla 19. Datos y Resultados: Ensayo de Densidad en Árido Fino .....	83
Tabla 20. Datos y Resultados: Ensayo de Densidad de Árido Grueso.....	83
Tabla 21. Datos y Resultados. Ensayo de Humedad Óptima. ....	84
Tabla 22. Datos de Muestra y Análisis de Betún Asfáltico. (PETROECUADOR S.A., 2019) .....	86
Tabla 23. Resultados de Análisis del Betún Asfáltico. (PETROECUADOR S.A., 2019).....	86
Tabla 24. Datos y Resultados. Ensayo de Determinación del Tamaño de Grano de Caucho Reciclado. ....	87
Tabla 25. Datos y Resultados. Ensayo RICE. ....	88
Tabla 26. Datos y Resultados. Ensayo Marshall de Muestras Convencionales. ....	90
Tabla 27. Parámetros de Porcentaje Óptimo. Mezcla Convencional. ....	92
Tabla 28. Datos y Resultados. Ensayo Marshall de Muestras Modificadas con un 10% de GCR.....	94
Tabla 29. Parámetros de Porcentaje Óptimo. Mezcla Modificada con 10% de GCR. ....	96
Tabla 30. Datos y Resultados. Ensayo Marshall de Muestras Modificadas con un 15% de GCR.....	97
Tabla 31. Parámetros de Porcentaje Óptimo. Mezcla Modificada con 15% de GCR. ....	99
Tabla 32. Datos y Resultados. Ensayo Marshall de Muestras Modificadas con un 20% de GCR.....	100
Tabla 33. Parámetros de Porcentaje Óptimo. Mezcla Modificada con 20% de GCR. ....	102
Tabla 34. Datos y Resultados. Ensayo de Abrasión de Muestras. ....	103



Tabla 35. Análisis de Precios Unitarios: Asfalto Producido en Planta-Asfalto Convencional.	104
Tabla 36. Análisis de Precios Unitarios: Asfalto Puesto en Obra-Asfalto Convencional...	104
Tabla 37. Análisis de Precios Unitarios: Asfalto Producido en Planta-Asfalto Modificado con GCR.....	105
Tabla 38. Análisis de Precios Unitarios: Asfalto Puesto en Obra-Asfalto Modificado con GCR.....	106
Tabla 39. Comparación de Precios. Asfalto Convencional - Asfalto Modificado con GCR.	107

## Índice de Figuras

Figura 1. Estructura de un Pavimento Flexible. ....	20
Figura 2. Capas que Conforman el Pavimento Flexible. ....	21
Figura 3. Esquema Coloidal del Asfalto. (Fajardo & Vergaray, 2014).....	32
Figura 4. Ilustración de los Vacíos en el Agregado Mineral (VMA). ....	35
Figura 5. Carcasas Clasificadas en Planta. ....	44
Figura 6. Ficha de Causas para Rechazar Carcasas. ....	45
Figura 7. Carcasas Rechazadas.....	45
Figura 8. Máquina de Buffeado.....	46
Figura 9. Cuchillas de la Máquina de Buffeado. ....	46
Figura 10. Tubo de Aspiración de la Máquina de Buffeado. ....	47
Figura 11. Tanque de Almacenamiento de Polvo de Caucho. ....	47
Figura 12. Salida del Polvo de Caucho desde la Criba.....	48
Figura 13. Polvo de Caucho Utilizado. ....	48
Figura 14. Esquema de Incorporación del Polvo de Caucho al Asfalto por Vía Húmeda. (Navarro, 2013) .....	50
Figura 15. Esquema de Incorporación del Polvo de Caucho al Asfalto por Vía Seca. (Navarro, 2013).....	50
Figura 16. Probetas con Asfalto sin Modificar.....	59
Figura 17. Preparación de Lotes de Agregado para la Elaboración de Briquetas. ....	60
Figura 18. Mezcla de Asfalto y Caucho. ....	60
Figura 19. Preparación de la Mezcla. ....	61
Figura 20. Martillo y Pedestal de Compactación. ....	62
Figura 21. Especímenes con 10% de GCR.....	62
Figura 22. Disposición de Tamices. ....	65
Figura 23. Disposición de Tamices en la Máquina Tamizadora. ....	66
Figura 24. Material Obtenido al Sacar del Tambor de la Máquina de los Ángeles.....	67
Figura 25. Material Grueso Lavado.....	69
Figura 26. Secado Superficial de las Partículas de Agregado. ....	70
Figura 27. Material en Estado SSS.....	71
Figura 28. Matraz con Material y Agua con Temperatura Constante. ....	71
Figura 29. Molde de Compactación + Muestra Compactada. ....	73
Figura 30. Limpieza de Muestras. ....	75
Figura 31. Probetas Sometidas a Baño María. ....	75
Figura 32. Muestra + Tazón de Prueba. Ensayo RICE.....	76
Figura 33. Muestras Ensayadas. Ensayo de Abrasión o Desgaste. ....	78
Figura 34. Curva Granulométrica de los Áridos Ensayados. ....	81
Figura 35. Curva de Humedad Óptima de Compactación.....	85
Figura 36. Curva Granulométrica del Grano de Caucho Reciclado. ....	87
Figura 37. Gmb vs. Porcentaje de Asfalto. Muestra Convencional. ....	91
Figura 38. Estabilidad vs. Porcentaje de Asfalto. Muestra Convencional .....	91
Figura 39. Porcentaje de Vacíos Totales vs. Porcentaje de Asfalto. Muestra Convencional. .....	91
Figura 40. Estabilidad vs. Porcentaje de Asfalto. 10% de GCR. ....	95
Figura 41. Gmb vs. Porcentaje de Asfalto. 10% de GCR. ....	95
Figura 42. Porcentaje de Vacíos Totales vs. Porcentaje de Asfalto. 10% de GCR. ....	95
Figura 43. Estabilidad vs. Porcentaje de Asfalto. 15% de GCR. ....	98





Figura 44. Gmb vs. Porcentaje de Asfalto. 15% de GCR. ....	98
Figura 45. Porcentaje de Vacíos Totales vs. Porcentaje de Asfalto. 15% de GCR. ....	98
Figura 46. Estabilidad vs. Porcentaje de Asfalto. 20% de GCR .....	101
Figura 47. Gmb vs. Porcentaje de Asfalto. 20% de GCR .....	101
Figura 48. Porcentaje de Vacíos Totales vs. Porcentaje de Asfalto. 20% de GCR.....	101

## Índice de Anexos

Anexo 1. Cantera Rookaazul.....	116
Anexo 2. Ubicación: Cantera Rookaazul. ....	116
Anexo 3. Planta ASFALTAR EP. Fuente: ASFALTAR EP.....	116
Anexo 4. Ubicación: Planta ASFALTAR EP.....	117
Anexo 5. Pesaje del agregado.....	117
Anexo 6. Clasificación del árido por tamaño de partícula. ....	117
Anexo 7. Martillo Marshall. ....	118
Anexo 8. Calentamiento del Betún y los Agregados.....	118
Anexo 9. Preparación de la mezcla asfáltica y calentamiento del molde.....	118
Anexo 10. Briquetas fabricadas con asfalto convencional. ....	119
Anexo 11. Polvo de Caucho. ....	119
Anexo 12. Modificación de asfalto con GCR. ....	119
Anexo 13. Briquetas de pavimento modificado con GCR. ....	120
Anexo 14. Cepillado de muestras.....	120
Anexo 15. Pesaje de muestras. ....	120
Anexo 16. Equipo MULTISPEED para ensayo Marshall de Estabilidad y Flujo.....	121
Anexo 17. Briqueta colocada en molde para ensayo.....	121
Anexo 18. Realización de ensayo Marshall de Estabilidad y Flujo. ....	121
Anexo 19. Esquipo Baño María. ....	122
Anexo 20. Briquetas puestas en Baño María.....	122
Anexo 21. Briqueta posterior al ensayo Marshall de Estabilidad y Flujo. ....	122
Anexo 22. Briqueta posterior al Ensayo de Abrasión. ....	123
Anexo 23. Picnómetro de ensayo Rice.....	123
Anexo 24. Informe de Resultados. Ensayo Betún AC-20.....	124

## Cláusula de Propiedad Intelectual

---

Yo, Jordi René Orellana Orellana, autor del trabajo de titulación “Dosificación óptima en pavimento flexible de asfalto y caucho reciclado utilizando materiales de la región”, certifico que todas las ideas, opiniones y contenidos expuestos en la presente investigación son de exclusiva responsabilidad de su autor/a.

Cuenca, 17 de octubre del 2019.



Jordi René Orellana Orellana

C.I. 0104456124

## Cláusula de Propiedad Intelectual

Yo, Jason Estevan Solano Mosquera, autor del trabajo de titulación “Dosificación óptima en pavimento flexible de asfalto y caucho reciclado utilizando materiales de la región”, certifico que todas las ideas, opiniones y contenidos expuestos en la presente investigación son de exclusiva responsabilidad de su autor/a.

Cuenca, 17 de octubre del 2019.



Jason Estevan Solano Mosquera

C.I. 0105518260

## Cláusula de licencia y autorización para publicación en el Repositorio Institucional

---

Yo, Jordi René Orellana Orellana en calidad de autor/a y titular de los derechos morales y patrimoniales del trabajo de titulación "Dosificación óptima en pavimento flexible de asfalto y caucho reciclado utilizando materiales de la región", de conformidad con el Art. 114 del CÓDIGO ORGÁNICO DE LA ECONOMÍA SOCIAL DE LOS CONOCIMIENTOS, CREATIVIDAD E INNOVACIÓN reconozco a favor de la Universidad de Cuenca una licencia gratuita, intransferible y no exclusiva para el uso no comercial de la obra, con fines estrictamente académicos.

Asimismo, autorizo a la Universidad de Cuenca para que realice la publicación de este trabajo de titulación en el repositorio institucional, de conformidad a lo dispuesto en el Art. 144 de la Ley Orgánica de Educación Superior.

Cuenca, 17 de octubre del 2019



Jordi René Orellana Orellana

0104456124

## Cláusula de licencia y autorización para publicación en el Repositorio Institucional

---

Yo, Jason Estevan Solano Mosquera en calidad de autor/a y titular de los derechos morales y patrimoniales del trabajo de titulación “Dosificación óptima en pavimento flexible de asfalto y caucho reciclado utilizando materiales de la región”, de conformidad con el Art. 114 del CÓDIGO ORGÁNICO DE LA ECONOMÍA SOCIAL DE LOS CONOCIMIENTOS, CREATIVIDAD E INNOVACIÓN reconozco a favor de la Universidad de Cuenca una licencia gratuita, intransferible y no exclusiva para el uso no comercial de la obra, con fines estrictamente académicos.

Asimismo, autorizo a la Universidad de Cuenca para que realice la publicación de este trabajo de titulación en el repositorio institucional, de conformidad a lo dispuesto en el Art. 144 de la Ley Orgánica de Educación Superior.

Cuenca, 17 de octubre del 2019



---

Jason Estevan Solano Mosquera

0105518260

## Agradecimientos

En primer lugar, agradecemos a Dios por darnos la vida y la fortaleza para continuar nuestro camino a paso firme.

A nuestros padres y hermanas, que con su infinito amor y apoyo nos han incentivado a luchar por nuestras metas.

A la Universidad de Cuenca, a la Facultad de Ingeniería por brindarnos el espacio y entorno debido para nuestra formación como profesionales.

A el Ing. Jaime Bojorque Ñeguez, por su contribución como tutor del presente trabajo de titulación. A el Ing. Daniel Mogrovejo y el Ing. Alfredo Vázquez por su disposición y consejos como lectores. A la Ing. Estefanía Rojas por todo el apoyo, gestión y tutorías para el desarrollo correcto de esta investigación.

A el Centro Tecnológico de la Construcción y su personal por brindarnos el espacio e insumos necesarios.

A todos quienes formaron parte de nuestro diario vivir para alcanzar esta meta, a nuestros primos, amigos, profesores y compañeros.

Jordi Orellana & Jason Solano



## Dedicatorias

A mis padres, a mi hermana y a “mamita”.  
Mi motor  
Mi inspiración  
Mis pilares

Jordi

A mis padres y a mi hermana, por siempre motivarme a seguir adelante y ayudarme siempre  
a ser una mejor persona

Jason



## Dosificación Óptima en Pavimento Flexible de Asfalto y Caucho Reciclado Utilizando Materiales de la Región

### 1. Introducción

Los neumáticos que se encuentran fuera de uso constituyen un problema medioambiental significativo en el mundo. La masiva fabricación de neumáticos requeridos para el funcionamiento de automóviles y la incorrecta disposición de éstos luego de haber cumplido su vida útil, los convierten en un factor de impacto negativo para el medio ambiente. La excesiva producción de llantas es una de las mayores cuestiones medioambientales de los últimos años, debido a su costoso proceso de fabricación y eliminación (Portafolio, 2010).

En Ecuador, 2'400.000 neumáticos se desechan anualmente, y gran parte de estos no son depositados correctamente, ya que terminan en carreteras, terrenos baldíos o cuerpos de agua, alterando, negativamente, los aspectos medio ambientales y paisajísticos de dichos espacios y de sus comunidades aledañas (El Universo, 2018). Actualmente, para eliminar estos desechos se recurre a diversos métodos de degradación, los cuales incluyen técnicas tales como: la termólisis, la trituración mecánica o criogénica y la incineración. Sin embargo, el almacenamiento no es una opción, si los neumáticos no son biodegradables, experimentan una peligrosa descomposición que contamina gravemente el medio ambiente (Isan, 2017).

Existen también otras medidas para el reciclaje de neumáticos, avaladas por el Acuerdo Ministerial 098 del Ministerio del Ambiente y contenidas en el Instructivo para la Gestión Integral de Neumáticos Usados. En base a este acuerdo, varias empresas ecuatorianas han visto en el reciclaje de neumáticos una medida con fines comerciales, convirtiendo las llantas desechadas en productos innovadores. Esto ahora es una tendencia, la cual invita a las industrias dedicadas a esta labor a consolidarse y, a su vez, generar acción en la población acerca de la importancia del reciclaje de neumáticos usados (Chuquimarca, 2019).

Dentro de las medidas de reciclado se encuentra la conversión en material para pavimento. Se trata de una técnica que empezó a ponerse en práctica en los años setenta en los Estados Unidos, y en su desarrollo, ha logrado grandes avances. Cabe mencionar que, esta técnica además de ser una forma de eliminación de grandes cantidades de caucho triturado, estudios han demostrado que usar el caucho triturado proveniente de una llanta en la composición de mezcla asfáltica, mejora sus características (Isan, 2017). Las mezclas asfálticas en caliente, es decir, aquellas utilizadas en pavimentos, pueden incorporar una parte significativa de caucho de neumáticos y de esta manera, promover potencialmente un consumo adecuado de neumáticos en desuso. La adición de caucho en las mezclas asfálticas puede contribuir a mitigar el problema medioambiental asociado a la producción masiva de neumáticos, así como también puede ser una forma de mejorar de sus propiedades, y de una manera más económica en comparación con modificadores alternativos (Navarro, 2013). Además, se conoce que la estructura vial no requiere solamente de la capa de rodadura, sino también de un sistema de recapeo. De esta manera, se puede asumir que al tener buenos resultados con el uso de caucho dentro de la estructura de pavimento flexible, éste puede ser utilizado de ambas maneras, ya que se conocen resultados sobre el mejoramiento en la permeabilidad de la carpeta, así como la reducción de vibraciones y un mejor desempeño general de la vía a la cual se le ha aplicado este sistema (Prasad & Prasada, 2009). De ahí que el presente trabajo de titulación *Dosificación Óptima en Pavimento Flexible de Asfalto y Caucho Reciclado Utilizando Materiales de la Región* busca la incorporación del caucho triturado en la

estructura de la carpeta asfáltica de manera que, mediante experimentación y pruebas, se pueda comprobar el cambio en las propiedades mecánicas de cada una de las muestras en comparación con una mezcla tradicional.

El principal problema de implementar esta propuesta es el desconocimiento del mejoramiento o deterioro de las propiedades mecánicas de la capa de rodadura, debido a la adición de caucho en su composición, dado que este no es un procedimiento conocido en el país, por lo que este método no es una opción comúnmente considerada como método de reciclaje de neumáticos fuera de uso.

Para la incorporación de polvo de caucho reciclado dentro de las mezclas asfálticas existe dos métodos: por vía húmeda y por vía seca. En la primera, se mezcla el caucho directamente con el ligante, como normalmente se trabajan los asfaltos modificados, para que posteriormente, se puedan añadir los agregados. Mientras que, la vía seca consiste en añadir los granos de caucho como una fracción de áridos, sustituyendo parte de la fracción fina de la mezcla, antes de incorporarla al ligante. Sin embargo, se debe considerar que los resultados a obtener dependen de varios factores como el tipo y la naturaleza del betún, la granulometría y el proceso de obtención del polvo de neumático, la composición química del aditivo o aditivos (si es que los lleva), las proporciones relativas de estos componentes, el sistema de fabricación y las condiciones de operación (CEDEX, 2007).

Por medio de la adición de caucho reciclado en la mezcla convencional de pavimento flexible, sea por vía húmeda o seca, se obtiene una mezcla con distintas propiedades. En base a ensayos normados de laboratorio, dichas propiedades podrán ser verificadas, para de esta manera, analizar el cambio que produce la adición de caucho en la mezcla asfáltica para pavimentos flexibles.

El presente estudio se centra en el efecto de la incorporación por vía húmeda, del polvo de caucho, proveniente del reciclaje de neumáticos, al betún asfáltico a través de ensayos de laboratorio aplicados a un total de sesenta y ocho muestras de mezcla asfáltica bajo el diseño Marshall. Propiedades mecánicas como estabilidad y flujo se analizaron a través del ensayo de sesenta muestras, quince de mezcla convencional y cuarenta y cinco modificadas con distintos porcentajes de caucho. Ocho muestras se diseñaron y probaron en la máquina de Los Ángeles con el fin de conocer el porcentaje de abrasión de dichas muestras.

### **1.1. Justificación**

El presente trabajo plantea utilizar polvo de neumáticos usados, reaprovechando, los desechos generados por estos, de esta manera apoyar a mitigar la contaminación ambiental. Además, se estudiará el efecto de la incorporación del caucho como ligante en el betún asfáltico a través de ensayos de laboratorio y comparación con mezclas asfálticas convencionales para determinar su dosificación óptima.

Debido a que existe poca práctica de este método en la región, la aplicación de esta investigación genera una nueva forma de aprovechar el caucho triturado de llanta aumentando así el reciclaje de los neumáticos fuera de uso y también considerar alternativas de cambiar la estructura de pavimento flexible por una con mejores propiedades y con carácter ecológico.

Para la aplicación de la modificación de pavimento flexible con caucho reciclado de llantas se debe conocer su dosificación óptima tanto de betún asfáltico como de caucho

triturado en los materiales de la región y de esta manera se puede considerar un método aplicable por las distintas empresas dedicadas a la pavimentación de vías.

## **1.2. Objetivos**

### **1.2.1. Objetivo General**

Determinar el porcentaje óptimo de la dosificación de caucho reciclado y betún asfáltico dentro de la mezcla para la elaboración de un pavimento flexible, que responda de la manera más eficiente a las propiedades de estabilidad, flujo y desgaste a ser evaluadas a través de los ensayos Marshall y de abrasión, en comparación con la mezcla asfáltica convencional (sin la incorporación de caucho reciclado).

### **1.2.2. Objetivos Específicos**

1. Caracterizar los materiales (agregados y betún asfáltico) y los materiales reciclados (caucho). La caracterización del agregado se realizará a través de ensayos de laboratorio (granulometría, límites de Atterberg, densidad y abrasión), mientras que para la caracterización del betún se tomarán los datos del proveedor. El material reciclado tendrá propiedades específicas respecto al tamaño.
2. Determinar el porcentaje óptimo de asfalto en muestras patrón de mezcla asfáltica convencional.
3. Determinar el porcentaje óptimo de asfalto y caucho reciclado en muestras de mezcla asfáltica modificada.
4. Comparar las propiedades y comportamiento de las muestras patrón versus muestras modificadas. Posterior a la obtención de los resultados de los ensayos, se realizará una comparación sobre el comportamiento de las muestras patrón en comparación con las muestras incorporadas con caucho en función de sus propiedades mecánicas como estabilidad, flujo y abrasión.
5. Establecer la dosificación óptima de asfalto y caucho reciclado para una mezcla asfáltica modificada en base a criterios a seguir basados en normativas existentes.

## 2. Marco Teórico

En esta sección se describe la parte teorica que fundamenta el presente trabajo de titulación, se parte de los conceptos básicos de la teoría de pavimentos hasta llegar a conceptos sobre los materiales específicos que se van a usar para el desarrollo de la investigación.

### 2.1. Pavimento

Un pavimento está constituido por un conjunto de capas superpuestas (Figura 1), relativamente horizontales, que se diseñan y se construyen técnicamente con materiales apropiados y adecuadamente compactados. Estas estructuras estratificadas se apoyan sobre la subrasante de una vía y han de resistir adecuadamente los esfuerzos que las cargas repetidas de tránsito les transmite durante el periodo de diseño o vida útil de dicha obra (Montejo Fonseca, 1998).

Entre las principales propiedades que debe cumplir con pavimento se encuentran (Martin & Wallace, 1962).

- Debe ser duradero, es decir, no debe disgregarse bajo la acción del tráfico y de los agentes atmosféricos.
- Debe ser antideslizante, la textura de la superficie ha de ser tal que el coeficiente de rozamiento con los neumáticos sea elevado, incluso con el pavimento mojado.
- Debe ser económico, hay que emplear los materiales menos caros capaces de producir un pavimento estable, duradero y antideslizante.

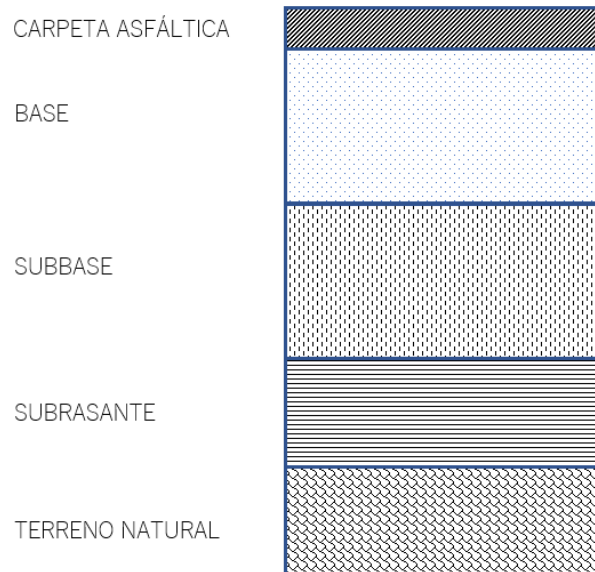


Figura 1. Estructura de un Pavimento Flexible.

#### 2.1.1. Tipos de Pavimento

Se consideran tres tipos de pavimento: rígido, flexible y articulado.

##### *Pavimento Rígido*

Son aquellos que fundamentalmente están constituidos por una losa de concreto hidráulico, apoyada sobre la subrasante o sobre una capa de material

seleccionado, la cual se denomina subbase de pavimento rígido. Su capacidad estructural depende de la resistencia de las losas y, por lo tanto, el apoyo de las capas subyacentes ejerce poca influencia en el diseño del espesor del pavimento (Montejo, 1997).

#### *Pavimento Flexible*

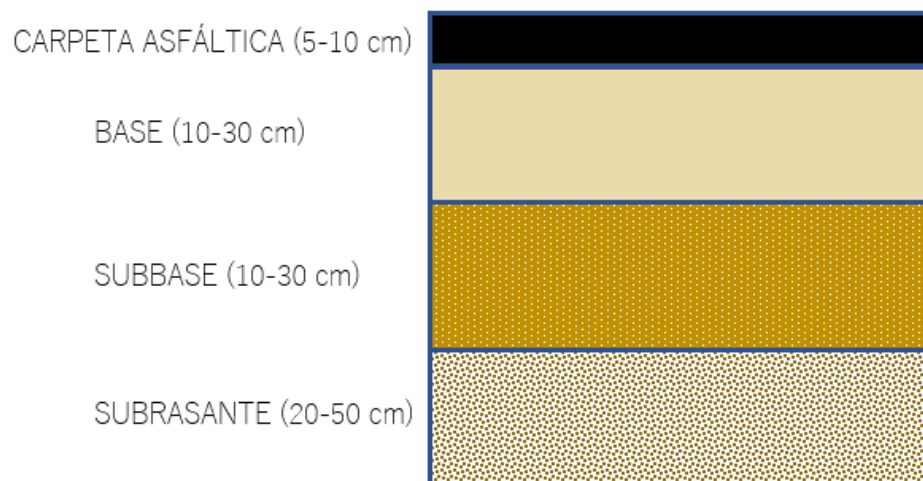
Los pavimentos flexibles se caracterizan por estar conformados principalmente de una capa de rodadura bituminosa, que se apoya sobre otras dos capas no rígidas llamadas base y subbase; sin embargo, es posible prescindir de estas capas dependiendo de la calidad de la subrasante y de las necesidades de cada obra (Montejo, 1997).

#### *Pavimento Articulado*

Los pavimentos articulados son aquellos en los cuales la capa superior o acabado está constituida por elementos prefabricados de concreto (adoquines) dichos elementos uniformes se colocan en yuxtaposición y que debido a la conformación de caras laterales se consigue una transferencia de cargas desde el elemento que la recibe hacia varios de sus adyacentes, trabajando solidariamente y sin posibilidad de desmontaje individual (Chaluiza, 2012).

### **2.1.2. Estructura del Pavimento Flexible**

Ya que el presente trabajo de titulación se centra en la estructura del pavimento flexible, en la Figura 2 se puede apreciar la superposición típica de las distintas capas que conforman dicho pavimento.



*Figura 2. Capas que Conforman el Pavimento Flexible.*

Entonces cada capa cumple una función en la estructura general, teniendo así:

#### *Capa de Rodadura (Carpeta Asfáltica)*

La capa de rodadura se fabrica de hormigón asfáltico en caliente, que es una mezcla de áridos bien graduados secados por calentamiento a temperatura

relativamente elevada y mezclados en caliente con betún asfáltico. El material mezclado en caliente se transporta a la obra, donde se deposita en una máquina extendedora, que lo coloca en capa uniformes; estas capas se compactan con apisonadora mientras la mezcla se conserva a temperatura suficiente para alcanzar la densidad adecuada (Martin & Wallace, 1962).

La capa de rodadura debe cumplir las siguientes funciones (Montejo, 1997):

- Superficie de rodamiento: La carpeta debe proporcionar una superficie uniforme y estable al tránsito, de textura y color conveniente y resistir los efectos abrasivos de tránsito.
- Impermeabilidad: Hasta donde sea posible, debe impedir el paso del agua al interior del pavimento.
- Resistencia: Su resistencia a la tensión complementa la capacidad estructural del pavimento.

#### *Capa de Base*

La función fundamental de la capa de base granular consiste en proporcionar un elemento resistente que transmita a la subbase y a la subrasante los esfuerzos producidos por el tránsito en una intensidad apropiada (Montejo, 1997).

#### *Capa de Subbase*

Las funciones de una subbase bien diseñada son (Montejo, 1997):

- Capa de transición: Impedir la penetración de los materiales que constituyen la base con los de la subrasante, y por otra parte actúa como filtro de la base impidiendo que los finos de la subrasante la contaminen menoscabando su calidad.
- Disminución de deformaciones: Los cambios volumétricos de la capa subrasante asociados a cambios en su contenido de agua o a cambios extremos de temperatura pueden absorberse en esta capa, impidiendo que dichas deformaciones se reflejen en la superficie de rodamiento.
- Resistencia: La subbase debe soportar los esfuerzos transmitidos por las cargas de los vehículos a través de las capas superiores y transmitidos a un nivel adecuado a la subrasante.
- Drenaje: En muchos casos la subbase debe drenar el agua, que se introduzca a través de la carpeta o por las bermas, así como impedir la ascensión capilar.

#### *Subrasante*

De la calidad de la subrasante que se va a emplear depende en gran parte el espesor que va a tener un pavimento. Como parámetro de evaluación de esta capa se emplea la capacidad de soporte o resistencia a la deformación por esfuerzo cortante bajos las cargas de tránsito. Es necesario tomar en cuenta la sensibilidad del suelo a la humedad, tanto en lo que se refiere a la resistencia como a las eventuales variaciones de volumen. Los cambios de volumen en un suelo de subrasante de tipo expansivo pueden ocasionar graves daños en las estructuras que se apoyen sobre esta (Montejo, 1997).



## 2.2. Mezclas Asfálticas

Las mezclas asfálticas se pueden definir como la combinación, en proporciones exactas y establecidas, de agregados pétreos con una granulometría de diseño, un material asfáltico y en el caso de ser requerido, aditivos, consiste en una mezcla en la cual todas las partículas de agregado, ya sea fino o grueso, están cubiertas de manera continua y homogénea por cemento asfáltico. (Verdezoto, 2016)

Para determinar las proporciones apropiadas de asfalto y agregado, en una mezcla asfáltica en caliente, comúnmente se utilizan dos métodos. Estos son: el Método Marshall (AASHTO T 245: Standard Method of Test for Resistance to Plastic Flow of Asphalt Mixtures Using Marshall Apparatus o ASTM D 1559: Test Method for Resistance of Plastic Flow of Bituminous Mixtures Using Marshall Apparatus) y el Método Hveem (AASHTO T 246: Standard Method of Test for Resistance to Deformation and Cohesion of Hot Mix Asphalt (HMA) by Means of Hveem Apparatus y T247: Standard Method of Test for Preparation of Test Specimens of Hot Mix Asphalt (HMA) by Means of California Kneading Compactor o ASTM D 1560: Standard Test Methods for Resistance to Deformation and Cohesion of Asphalt Mixtures by Means of Hveem Apparatus y D 1561: Standard Practice for Preparation of Bituminous Mixture Test Specimens by Means of California Kneading Compactor). Estos métodos tienen características y ventajas singulares, cualquiera de ellos, puede ser usado con buenos resultados. En nuestro país el método utilizado es el Método Marshall, por lo cual se emplea este método en el presente estudio (Cervera, 2016).

Existe un proceso de compactación al cual la mezcla asfáltica para pavimentación es sometida, el cual permite que todos los materiales que conforman la mezcla trabajen de manera homogénea en conjunto, en este las partículas de agregado se encuentran ligadas por el material asfáltico, es decir que las partículas de agregado están cubiertas completamente con una cantidad mínima de producto asfáltico formando una mezcla cohesiva, poco permeable y con un esqueleto interior pétreo que aporta resistencia y rigidez al sistema completo (Navarro, 2013).

Las propiedades físicas de la mezcla asfáltica y el desempeño de la misma, como un pavimento terminado, están determinadas por las características de los materiales que al mismo tiempo proporcionan una adecuada superficie de rodamiento, es decir: cómoda, segura y económica, a los usuarios de las vías, así como el hecho de transmitir adecuadamente las cargas debidas al tráfico, al terreno base (Fajardo & Vergaray, 2014).

En función de la temperatura se pueden determinar diferentes tipos de mezclas asfálticas. Se denominan en caliente cuando las mezclas se realizan sobre los 100°C o en frío cuando la mezcla se lleva a cabo a temperatura ambiente o ligeramente superior a esta (Navarro, 2013). Siendo la mezcla en caliente la que se realiza con mayor frecuencia en nuestra región y en la cual se basa la presente investigación.

### 2.2.1. Mezclas Asfálticas en Caliente

Son mezclas que presentan agregados pétreos con granulometría bien gradada y con tamaños de partículas sólidas diferente (gravas, arenas, finos), mezcladas con cemento asfáltico. Estas mezclas deben realizarse, extenderse y compactarse a altas temperaturas (140 – 180°C, dependiendo de la viscosidad del asfalto). Se caracterizan por presentar un bajo contenido de vacíos con aire en volumen. Son mezclas de muy buena calidad y

pueden ser utilizadas para conformar cualquier capa dentro de la estructura del pavimento asfáltico (Rondón & Reyes, 2015).

El proceso para fabricar una mezcla asfáltica en caliente se realiza en una planta asfáltica, las cuales cuentan con el equipo requerido para la dosificación de agregados, su combinación, calentamiento y mezclado con el asfalto. Las mezclas se transportan al lugar de pavimentación en camiones tolva, los cuales deben disponer de cubiertas de protección para minimizar las pérdidas de temperatura durante el transporte (Navarro, 2013).

Las mezclas que se realiza en la planta asfáltica deben cumplir con todos los requerimientos de calidad que exigen las normas vigentes del lugar en donde se realicen.

Las mezclas asfálticas en caliente que permite la Norma Ecuatoriana de Vialidad requieren el diseño bajo la metodología Marshall, según los criterios del Manual MS'2 del Instituto del Asfalto "*Mix Design Methods for Asphalt Concrete and Other Hot-Mix Types*".

Así una mezcla asfáltica está básicamente compuesta de agregados (áridos) y cemento asfáltico.

### *Agregados*

El árido o material granular es cualquier mineral duro e inerte que es usado en forma de partículas graduadas, dentro de la estructura de una mezcla asfáltica. Los agregados más utilizados en este tipo de mezclas incluyen generalmente agregados finos y gruesos como arena, grava, piedra triturada, escoria y polvo de roca. En la mayoría de las estructuras de pavimento el material granular utilizado en la mezcla final corresponde entre el 75 a 85% en volumen, y entre el 90 a 95% en peso. La calidad de los áridos tiene una influencia importante dentro de la capacidad portante que tendrá un pavimento, por lo que es necesario que se considere una buena selección del material (Fajardo & Vergaray, 2014).

#### *Agregado Grueso*

Árido en que la mayor parte de sus partículas quedan retenidas en el tamiz de 4.75 mm (No. 4), también se puede definir como la porción de un árido retenido sobre el tamiz de 4.75 mm (No. 4) (Instituto Ecuatoriano de Vialidad, 2012).

#### *Agregado Fino*

Árido que pasa por el tamiz de 9.5 mm (3/4") y que la mayor parte de sus partículas pasa por el tamiz de 4.75 mm (No. 4) y son retenidas en su mayoría en el tamiz 75um (No. 200), también se puede definir como la parte de un árido que pasa por el tamiz de 4.75 mm (No. 4) y es retenido en el tamiz de 75 um (No. 200) (Instituto Ecuatoriano de Vialidad, 2012).

#### *Fuentes de Áridos*

Los agregados a usar en el pavimento asfáltico se clasifican generalmente de acuerdo al origen. Estos son:

- Agregados naturales



- Agregados procesados
- Agregados sintéticos

#### *Agregados Naturales*

Los agregados naturales se consideran aquellos que se usan en su forma natural, es decir, con poco o ningún tipo de procesamiento. Estos agregados, se conforman de partículas producidas mediante algunos procesos naturales de erosión y degradación; tales como la acción del viento, el agua, el movimiento del hielo y los químicos. La forma de las partículas depende de los agentes que actúan sobre ellas. Los glaciares, por ejemplo, usualmente producen rocas y guijarros redondeados, y las corrientes de agua producen partículas lisas y redondeadas (Universidad de Piura, s.f).

Los principales tipos de agregado natural que son usados para la elaboración de pavimentos son la grava y arena. La grava, usualmente, está conformada por partículas de un tamaño igual o mayor que  $\frac{1}{4}$  de pulgada (6.35 mm). La arena, usualmente, son partículas de un tamaño menor que 6.35 mm, pero mayor que  $75 \mu\text{m}$  (No. 200). Las partículas que tienen un tamaño menor a  $75 \mu\text{m}$ , son conocidas como rellenos minerales, los cuales consisten principalmente de limo y arcilla. Las gravas y las arenas son clasificadas, además, de acuerdo a su origen. Los materiales producidos en canteras abiertas y usados sin ningún procesamiento adicional, son conocidos como materiales en bruto, y los materiales de la ribera de los ríos son conocidos como materiales de canteras de ríos (Fajardo & Vergaray, 2014).

#### *Agregados Procesados.*

Los agregados procesados son aquellos que para su obtención han sido triturados y tamizados antes de ser usados. Existen dos fuentes principales de agregados procesados: las gravas naturales que son trituradas para volverlas más apropiadas para pavimentos de mezcla asfáltica y los fragmentos de lecho de roca y de piedras grandes que deben ser reducidos en tamaño antes de ser usados en la pavimentación (Universidad de Piura, s.f).

Tras esto, cabe destacar que el proceso de trituración de la roca se da por tres razones: para cambiar la textura superficial de las partículas de lisa a rugosa; para de esta manera, cambiar la forma de la partícula de redonda a angular y para reducir; así como, mejorar la distribución y la gradación de los tamaños de las partículas. El propósito principal de la trituración, en el caso de los fragmentos de lecho de roca y de piedras grandes, es reducir las piedras a un tamaño que sea manejable. Sin embargo, los cambios en la textura superficial y en la forma de las partículas, son también muy importantes (Universidad de Piura, s.f).

El tamizado de los materiales, después de ser triturados da como resultado una granulometría con cierto rango de tamaño de partícula. Un factor importante en la construcción de pavimentos de buena

calidad consiste en mantener graduaciones específicas de agregados. Sin embargo, por razones económicas, el material triturado es usado tal y como sale del triturador, con muy poco o ningún tamizado. Para un control adecuado de las operaciones de triturado, es necesario determinar si la graduación resultante del agregado cumple, o no, con los requisitos de la obra. El agregado triturado, sin tamizar, es conocido como agregado triturado sin cribar; y es usado satisfactoriamente en muchos proyectos de construcción de pavimentos. Sin embargo, es esencial garantizar que la operación de triturado sea continuamente supervisada para poder producir un agregado que cumpla con las especificaciones (Fajardo & Vergaray, 2014).

#### *Agregados Sintéticos*

Los agregados sintéticos o artificiales no existen en la naturaleza. Ellos son el producto del procesamiento físico o químico de materiales. Algunos son subproductos de procesos industriales de producción como el refinamiento de metales. Otros son producidos mediante el procesamiento de materias primas, para ser usados específicamente como agregado.

El producto secundario más comúnmente usado es la escoria de alto horno. Ésta es una sustancia no metálica que brota a la superficie del hierro fundido durante el proceso de reducción. Una vez que es removida de la superficie del hierro, la escoria es transformada en pequeñas partículas, templándola inmediatamente en agua, o triturándola una vez que se ha enfriado.

Los agregados sintéticos manufacturados son relativamente nuevos en la industria de la pavimentación. Son producidos al quemar arcilla, arcilla esquistosa, tierra diatomácea procesada, vidrio volcánico, escoria y otros materiales. Los productos finales son típicamente livianos y tienen una resistencia muy alta al desgaste (Fajardo & Vergaray, 2014).

#### *Propiedades del Agregado*

En la mezcla de un pavimento asfáltico, los áridos conforman el 90 a 95 %, en peso, de la mezcla asfáltica. Por lo que se considera que el uso de agregados de buena calidad es un factor determinante en el comportamiento del pavimento. Sin embargo, además de la calidad, se deben tomar en cuenta otros criterios para la selección de un agregado dentro de una obra de pavimentación. El costo y la disponibilidad del agregado son criterios importantes dentro de los parámetros de selección. Un agregado que cumpla con los requisitos de costo y disponibilidad, deberá también cumplir ciertas propiedades para poder ser considerado apropiado para poder ser utilizado dentro de una obra de pavimentación. Las propiedades más importantes de los agregados que se usan para la construcción de pavimentación son (Fajardo & Vergaray, 2014):

- Tamaño y graduación de las partículas

- Dureza o resistencia al desgaste
- Durabilidad o resistencia al interperismo
- Limpieza
- Capacidad de absorción
- Forma de partícula y textura de la superficie
- Peso específico

#### *Tamaño y Graduación de las Partículas*

Una propiedad clave de los agregados que se usan en las bases y superficies de las carreteras es la distribución de los tamaños de partículas al mezclarlos. La graduación de los agregados, esto es, la combinación de tamaños de partículas en la mezcla, afecta la densidad, la resistencia, y la economía de la estructura del pavimento.

Se usa un análisis granulométrico para determinar las propiedades relativas de los diferentes tamaños de partículas en una mezcla de agregados minerales. Para llevarlo cabo, se pasa una muestra pesada de agregado seco a través de un juego de mallas o tamices cuyo tamaño de abertura ha sido seleccionado previamente. Los tamices se agrupan colocando hasta arriba los que tienen la abertura mayor y debajo aquellos con aberturas sucesivamente más pequeñas. La muestra de agregado se agita con un vibrador mecánico de mallas y se determina el peso del material retenido en cada tamiz, el cual se expresa como un porcentaje de la muestra original. En el método T27 de la AASHTO se dan los procedimientos detallados para ejecutar un análisis granulométrico de agregados gruesos y finos (Ingeniero Civil Info, 2011).

#### *Dureza y Resistencia al Desgaste*

Los materiales que se usan en las mezclas asfálticas deberán ser duros y resistir al desgaste debido al efecto pulido del tránsito y a los efectos abrasivos internos de las cargas repetidas. La estimación más comúnmente aceptada de la dureza de los agregados es la prueba de abrasión de Los Ángeles. La máquina que se usa en esta consta de un cilindro de acero hueco, cerrado en ambos extremos y montado en ejes, en posición horizontal (Universidad Mayor de San Simón: Facultad de Ciencias y Tecnología, 2004).

#### *Durabilidad o Resistencia al Intemperismo*

Comúnmente, la durabilidad de los agregados se mide con una prueba de integridad, como se describe en el método T-104 de AASHTO. Esta prueba mide la resistencia de los agregados a la desintegración en una solución saturada de sulfato de sodio o magnesio. Simula el intemperismo de los agregados que existen en la naturaleza (Universidad Mayor de San Simón: Facultad de Ciencias y Tecnología, 2004).

### *Limpieza*

Las especificaciones de obra, generalmente ponen un límite a los tipos y cantidades de materiales indeseables (vegetación, arcilla esquistosa, partículas blandas, terrones de arcilla, etc.) en el agregado. Las cantidades excesivas de estos materiales pueden afectar desfavorablemente el comportamiento del pavimento. La limpieza del agregado puede determinarse mediante una inspección visual; pero un tamizado por lavado (donde el peso de la muestra de agregado, antes de ser lavado, es comparado con su peso después de ser lavada) proporciona una medida exacta del porcentaje de material indeseable más fino que 75  $\mu\text{m}$  (No. 200). El ensayo de arena T 176 de AASHTO, es un método que determina el porcentaje de polvo fino y arcilla indeseable que pasa el tamiz de 4.75 mm (No. 4) (Chimborazo, 2012).

### *Capacidad de Absorción*

Todos los agregados son porosos, y algunos más que otros. La cantidad de líquido que un agregado absorbe cuando es sumergido determina su porosidad.

La capacidad de absorción de agua en un agregado o asfalto es una propiedad de alta importancia. Si un agregado es altamente absorbente, entonces continuará absorbiendo asfalto después del mezclado inicial, dejando así menos asfalto en la superficie para ligar las demás partículas de agregado. Por lo tanto, un agregado de alta porosidad requiere cantidades de asfalto muchos mayores que las que requiere un agregado de menor porosidad (Asociación de Productores y Pavimentadores Asfálticos de Colombia, 2004)

### *Forma de Partícula y Textura de la Superficie*

Por lo general, las especificaciones para agregados que se usan en la construcción de pavimentos tienen requerimientos relacionados con la forma de la partícula, la textura de la superficie y la limpieza del agregado. Normalmente, las especificaciones para agregados que se usan en las mezclas asfálticas requieren que los agregados sean resistentes, limpios, durables y libres de cantidades de exceso de piezas planas o alargadas; polvo, bolas de arcilla y otro material indeseable (Fajardo & Vergaray, 2014).

### *Peso Específico*

El peso específico de un agregado se entiende como la relación entre el peso de un volumen dado de agregado y el peso de un volumen igual de agua. El peso específico es una forma de expresar las características de peso y volumen de materiales. Estas características son especialmente importantes en la producción de mezclas asfálticas debido a que el agregado y el asfalto son proporcionados, en la mezcla, de acuerdo al peso (Peralta, 2016).

Una tonelada de agregado de bajo peso específico, tiene un volumen mayor (ocupa más espacio en la mezcla), a

diferencia de una tonelada de agregado con un peso específico más alto. Por tanto, para poder cubrir todas las partículas de agregado, debe adicionarse más asfalto a una tonelada de agregado con bajo peso específico (debido que tiene un volumen mayor); a diferencia de a una tonelada de agregado con un peso específico más alto (por tener menos volumen).

Una razón por la cual es importante conocer el peso específico de los agregados es que permite calcular el porcentaje de vacíos de aire, de las mezclas asfálticas compactadas (espacios de aire). Estos espacios desempeñan una labor importante en la estructura de pavimento terminado.

Todos los agregados son, hasta cierto punto, porosos. Se han desarrollado tres tipos de peso específico para tener en cuenta la porosidad del agregado, ya que esta propiedad de porosidad, afecta la cantidad de asfalto que se requiere para cubrir las partículas de agregado y también el porcentaje de vacíos de aire en la mezcla final. Estos tres tipos son:

- Peso específico total (neto): incluye todos los poros de la muestra, con ello, asume que los poros que absorben agua, no absorben asfalto; esto hace una suposición falsa (excepto en casos muy raros).
- Peso específico aparente: no incluye, como parte del volumen de la muestra, los poros y espacios capilares que se llenarían de agua al mojar la muestra; con ello, asume que todos los poros que son permeables al agua, absorberán asfalto, esto hace una suposición falsa (excepto en casos muy raros).
- Peso específico efectivo: excluye, del volumen de la muestra, todos los poros y espacios capilares que absorben asfalto; con ello, discrimina entre poros permeables al agua y poros permeables al asfalto, por lo cual hace que esta suposición se acerque al valor correcto, y que debería ser usado en los cálculos de mezclas asfálticas.

### *Cemento Asfáltico*

Se entiende por ligante bituminoso, al cemento asfáltico o material fabricado a partir de cemento asfáltico. El cemento asfáltico es un residuo del proceso de destilación del petróleo. En ciertos yacimientos se encuentran asfaltos de origen natural. Según su aplicación, el cemento asfáltico podrá ser modificado a través de una mezcla uniforme con otros componentes, para cumplir con requisitos de desempeño específicos.

El asfalto, cuando se habla de pavimentación, se define como un material viscoso y pegajoso. Entonces, significa que este material se adhiere a las partículas de árido y, por lo tanto, actúa como material cementante para unir las partículas de agregado en un pavimento.

El cemento asfáltico es un excelente material impermeabilizante, ya que este no presenta afección debido a los ácidos, los álcalis o sales. Esto quiere decir, que un pavimento de concreto asfáltico fabricado de manera adecuada, es impermeable y tiene un buen comportamiento ante ataques químicos.

El asfalto, cuando aumenta su temperatura o envejece, sus propiedades cambian. Esto tiene como resultado que su fragilidad y dureza aumenten, así como la pérdida de su capacidad de adherencia a las partículas de agregado. Al comprender adecuadamente las propiedades del asfalto, estos cambios pueden ser minimizados, y, si durante la construcción del pavimento, se van tomando medidas necesarias para garantizar que este, cuando esté terminado, sea construido de tal manera que pueda retardarse el proceso de envejecimiento (Fajardo & Vergaray, 2014).

Dichas propiedades se clasifican en químicas y físicas, teniendo así lo siguiente:

#### Propiedades Químicas

El asfalto está compuesto primordialmente por moléculas complejas de hidrocarburos, aunque también contiene átomos de oxígeno, nitrógeno, azufre, sulfuro y otros elementos.

La proporción de asfaltenos y máltenos en un ligante varía normalmente debido al proceso de envejecimiento o endurecimiento que sufre el asfalto en el tiempo. El envejecimiento produce cambios considerables en sus propiedades, que lo transforman en un material más rígido y con menor poder aglomerante. El envejecimiento del asfalto se produce por variadas y complejas reacciones de oxidación, volatilización y polimerización, principalmente, cuando este está expuesto a agentes ambientales como las altas temperaturas y el oxígeno. Durante la vida del asfalto, se pueden distinguir dos importantes procesos de envejecimiento (Navarro, 2013):

- Envejecimiento primario o de corto plazo: Empieza desde la elaboración de la mezcla en planta, hasta el momento de la compactación. Se origina, en gran parte, debido a las altas temperaturas a las que el asfalto es sometido durante la fabricación de los concretos asfálticos. La evaporación de los materiales constituyentes más livianos es considerada la razón principal.
- Envejecimiento secundario o de largo plazo: Es al que se ve sometido el asfalto durante el periodo de vida útil del pavimento. La reacción del asfalto con el oxígeno (oxidación) es su causa principal.

#### Propiedades Físicas

Las principales propiedades físicas del asfalto para su diseño, construcción y mantenimiento en vías y caminos son (Navarro, 2013):

- Durabilidad: Es la capacidad que tiene el asfalto de mantener sus características originales cuando es expuesto a procesos de envejecimiento y degradación.



- Adhesión: Es la propiedad que tiene el asfalto para unirse al agregado en la mezcla, incluso en presencia de agua, tránsito y cambios bruscos de temperatura.
- Cohesión: Es la capacidad que tiene el asfalto de unir y mantener en su posición las partículas de agregado en la mezcla compactada.
- Susceptibilidad Térmica: Se entiende como la sensibilidad de la consistencia del asfalto a los cambios de temperatura.
- Susceptibilidad a la Duración de la Carga: La viscosidad del asfalto se encuentra también en función de la duración de los esfuerzos a los que está sometido, similar a lo que ocurre con la temperatura. A elevadas temperaturas y/o cargas estáticas o lentas, el asfalto tiende a comportarse a manera de un fluido viscoso que fluye rápidamente y cuya deformación no es recuperable (pavimento propenso a sufrir ahuellamiento). Mientras que, a bajas temperaturas y/o cargas rápidas, el comportamiento del asfalto tiende a ser como un sólido elástico cuya deformación se ve reducida y es recuperable (pavimento muy rígido pueden ser susceptible al agrietamiento). Esta condición visco elástica (semisólida) les concede a los asfaltos su capacidad de resistir altos esfuerzos instantáneos y solo fluir bajo la acción de cargas permanentes.

#### Composición del Asfalto

La composición química de los asfaltos es muy compleja, básicamente está constituida por cadenas de moléculas compuestas fundamentalmente por carbono, hidrógeno, azufre, oxígeno, nitrógeno y complejos de vanadio níquel, hierro, calcio y magnesio.

La composición específica de un asfalto en particular depende de la procedencia del petróleo crudo del cual procede.

El análisis químico del asfalto es muy laborioso, sin embargo, es posible distinguir dos grandes grupos que lo constituyen: los asfáltenos y máltenos.

El modelo adoptado para configurar la estructura del asfalto se denomina modelo micelar, donde existen dos fases; una discontinua (aromática) formada por dos asfáltenos y una continua que rodea y solubiliza a los asfáltenos, denominada máltenos. Las resinas contenidas en los máltenos son intermediarias en el asfalto, lo que cumple la misión de homogeneizar y compatibilizar a los de otra manera insolubles asfáltenos. Los máltenos y asfáltenos existen como islas flotando en el tercer componente del asfalto, los aceites.

Según el grado de aromaticidad de los máltenos y la naturaleza de la concentración de los asfáltenos, se pueden formar dos tipos de estructuras: Asfalto tipo Sol y el Asfalto tipo Gel. El primero en mención, tiene alta ductilidad, gran susceptibilidad a los cambios de temperatura, su elasticidad no puede medirse y tiene un elevado desarrollo de resistencia con el tiempo. Los asfaltos tipo gel tienen baja ductilidad, baja susceptibilidad a los cambios de temperatura, su elasticidad no puede medirse y tiene un bajo desarrollo de

resistencia con el tiempo. Hay un tipo de asfaltos llamados medianos que tiene una estructura intermedia entre sol y gel.

Con ello se obtiene información que el asfalto tipo sol, es típico asfalto de carreteras; y el asfalto tipo gel, es típico asfalto para impermeabilización (Fajardo & Vergaray, 2014).

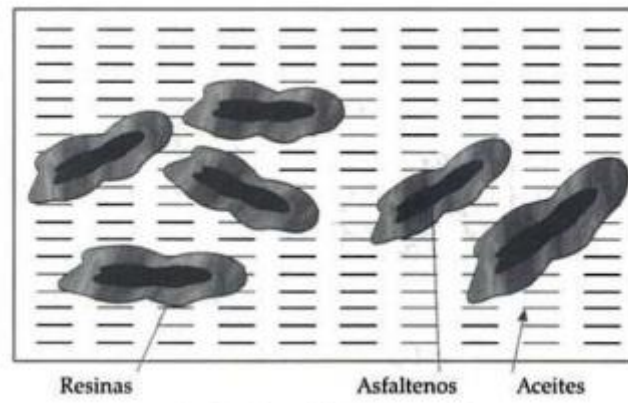


Figura 3. Esquema Coloidal del Asfalto. (Fajardo & Vergaray, 2014)

#### Tipos de Asfalto Utilizados en Pavimentos

Los asfaltos de pavimentación pueden clasificarse bajo tres tipos generales:

##### *Cementos Asfálticos*

Se consideran el tipo de cemento más utilizado en proyectos de pavimentación. Estos se sub clasifican en tres sistemas diferentes:

- Viscosidad antes del envejecimiento
- Viscosidad después del envejecimiento
- Penetración

Se prepara comercialmente en grados o rangos de consistencia, con base en los resultados obtenidos en el ensayo de penetración, por ejemplo: AC 70-90, AC 60-80, AC 80-100.

Los números señalan la penetración en décimas de milímetro. Uno de los ensayos mayormente utilizado en la caracterización del asfalto es el ensayo de penetración (Fajardo & Vergaray, 2014).

##### *Asfaltos Líquidos*

Son materiales asfálticos de consistencia blanda o fluida por lo que no son considerados aptos para el ensayo de penetración, cuyo límite máximo es 300. Están compuestos por una fase asfáltica y un fluidificante volátil, que puede ser bencina, querosene o aceite. Los fluidificantes se evaporan (proceso de curado), quedando el residuo asfáltico el cual envuelve y cohesiona las partículas del agregado (Fajardo & Vergaray, 2014).



### *Emulsiones Asfálticas*

Las emulsiones asfálticas son una mezcla de asfalto con emulsificante, que con el agua forman una emulsión estable que permitirá tender las carpetas asfálticas “en frío”; es decir, a temperaturas que estarán por debajo de los 100 °C.

En conclusión, los asfaltos diluidos y los emulsificados son usados, casi por completo, en mezclas en frío y en riegos; mientras que, los cementos asfálticos (AC) son usados en mezclas en caliente, y no se discutirán más por no ser tema de estudio para la presente tesis (Fajardo & Vergaray, 2014).

### *Asfalto Modificado*

La tecnología y el avance en los estudios de las mezclas asfálticas modificadas no es un tema novedoso en la actualidad, se han realizado diversos estudios y ha sido ampliamente utilizada alrededor del mundo. Con la adición de polímeros u otros productos se busca modificar las propiedades físico – mecánicas, químicas y reológicas de las mezclas asfálticas. El objetivo de la utilización de esta metodología se pretenden mejorar el comportamiento que experimentan las mezclas asfálticas tradicionales cuando son sometidas a diferentes condiciones de carga y de medioambiente.

Por lo general las propiedades que se intentan mejorar son la rigidez y resistencia bajo carga monotónica, el ahuellamiento, la fatiga y el envejecimiento, así como disminuir los daños provocados por la susceptibilidad térmica y el daño por humedad natural. Por otro lado, también se utilizan frecuentemente los asfaltos modificados cuando es necesario que la superficie de la carretera posea una vida útil más larga de lo normal o en aplicaciones especializadas que permiten espesores más delgados de capas asfálticas o disminuir dichos espesores (Rondón & Reyes, 2015).

### **2.2.2. Características y Comportamiento de la Mezcla**

Para el análisis del posible desempeño de la mezcla se requiere en laboratorio preparar una muestra de pavimentación. Dicho análisis está centrado en cuatro propiedades de la mezcla asfáltica, y el peso que éstas van a tener dentro del desempeño en campo de dicha mezcla asfáltica.

Estas características son (Cervera, 2016):

1. Densidad de la mezcla
2. Vacíos de aire
3. Vacíos en el agregado mineral
4. Contenido de asfalto

#### *Densidad*

La densidad de una mezcla compactada se define como su peso unitario. Es una característica muy importante, por lo que se debe considerar el obtener un valor alto de densidad en el pavimento que se va a utilizar en campo para que su rendimiento sea duradero.

Dentro del diseño de mezclas, la densidad de la mezcla compactada se expresa, generalmente, en kilogramos por metro cúbico. La densidad es obtenida al multiplicar la gravedad específica total de la mezcla por la densidad del agua ( $1000 \text{ kg/m}^3$ ). El valor de densidad obtenido en laboratorio se convierte en la densidad patrón, la cual se utiliza como parámetro de referencia en la determinación de la densidad del pavimento terminado y su cumplimiento con las normativas. Las especificaciones generalmente establecen que la densidad del pavimento sea un porcentaje de la densidad del laboratorio. Esto se debe a que la compactación in situ usualmente no logra las densidades que se obtienen usando los métodos normalizados de compactación de laboratorio (Asphalt Institute, 2001).

#### *Vacíos de Aire*

Los vacíos de aire consisten en pequeñas bolsas de aire, atrapadas entre los agregados revestidos de la mezcla final compactada. Es primordial que las mezclas densamente graduadas contengan cierto porcentaje de vacíos para dar paso a una compactación adicional debido a las cargas de tráfico, y permitir el flujo de asfalto durante su compactación adicional. El porcentaje de vacíos establecidos en normativas para capas de base y capas de rodadura está entre 3 y 5 por ciento, dependiendo del diseño y aplicación.

El contenido de vacíos determina la durabilidad de un pavimento asfáltico. Debido a que mientras exista una reducción en el porcentaje de vacíos, la permeabilidad de la mezcla se verá igualmente reducida. El bajo contenido de vacíos proporciona pasajes, a través de la mezcla, por los cuales el agua y el aire ingresan y causan deterioro en la mezcla. Al contrario, un contenido excesivo de vacíos puede ocasionar que el asfalto sea exprimido fuera de la mezcla hacia la superficie, un fenómeno conocido como exudación (Hernández & Ramírez, 2016).

La densidad y el contenido de vacíos son propiedades que están relacionadas de manera directa. Mientras mayor sea el aumento de la densidad menor es el porcentaje de vacíos en la mezcla, y viceversa. Las normativas para su aplicación en obra requieren, una densidad que permita obtener el menor número posible de vacíos: preferiblemente menos del 8 por ciento (Asphalt Institute, 2001).

#### *Vacíos en el Agregado Mineral*

Los vacíos en el agregado mineral (VMA), ilustrados en la Figura 4 son los espacios de aire atrapados entre las partículas de árido en una mezcla compactada de pavimentación, incluyendo los espacios llenos de asfalto.

El VMA es el espacio que dispone la mezcla para acomodar el volumen efectivo de asfalto, es decir todo el asfalto menos la porción que se pierde en el agregado, y el volumen de vacíos necesario en la mezcla. Mientras el VMA incrementa habrá disponible más espacio para las películas de asfalto. Existen valores mínimos para VMA los cuales están en función del tamaño del agregado y que se especifican en normativas vigentes. Esto quiere decir que

cuanto más gruesa sea la película de asfalto que cubre las partículas de agregado, más durables será la mezcla asfáltica (Peralta, 2016).

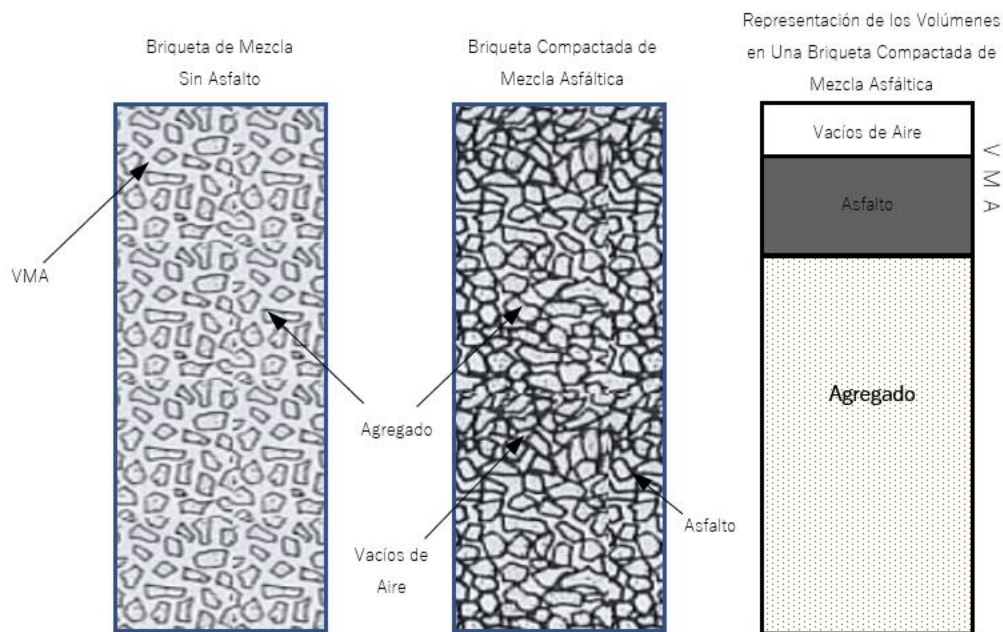


Figura 4. Ilustración de los Vacíos en el Agregado Mineral (VMA).

Obteniendo valores mínimos de VMA se puede lograr un espesor durable de película de asfalto. Las películas delgadas de asfalto son producto del aumento de la densidad de la graduación de agregado, obteniendo valores de VMA por debajo del especificado, resultando en mezclas de baja durabilidad y apariencia seca. Entonces se puede asumir que es perjudicial, para la calidad del pavimento, disminuir el VMA para la economización del contenido de asfalto (Asphalt Institute, 2001).

#### Contenido de Asfalto

El porcentaje de asfalto en la mezcla es muy importante y debe determinarse de manera exacta en el laboratorio, de igual manera se debe realizar un riguroso control al momento de preparar la mezcla asfáltica en obra.

Las características del agregado como la granulometría y la capacidad de absorción, son factores determinantes en el contenido óptimo de asfalto que tendrá la mezcla. La granulometría del agregado está directamente relacionada con el contenido óptimo del asfalto. Entre mayor sea el porcentaje de árido fino que contenga la graduación de la mezcla, el área superficial total se verá incrementada, y, por lo tanto, mayor será la cantidad de asfalto requerida para cubrir, adecuadamente, todas las partículas. Por otro lado, las mezclas con una graduación más gruesa (agregados más grandes) exigen menos contenido de asfalto debido a que poseen menos área superficial total que cubrir.

El área superficial del árido y el contenido óptimo de asfalto tienen una relación mayor cuando existen fracciones muy finas de agregado, es decir, que pasan a través del tamiz de 75  $\mu\text{m}$  (N.º 200). Una mezcla inestable y seca puede ocasionarse debido a la absorción ocasionada por los incrementos en el contenido de relleno mineral del asfalto. Por otro lado, las mezclas muy húmedas se ocasionan por la existencia de muy poco o falta de relleno mineral. Por lo que se deduce que cualquier variación en el contenido de relleno mineral, por mínimo que sea, puede ocasionar cambios en las propiedades de la mezcla, haciéndola variar de seca a húmeda. Si una mezcla contiene poco o demasiado, relleno mineral, cualquier ajuste arbitrario, para corregir la situación, probablemente la empeorará. En vez de hacer ajustes arbitrarios, se deberá efectuar un muestreo y unas pruebas apropiadas para determinar las causas de las variaciones y, si es necesario, establecer otro diseño de mezcla (Blanco & Montañez, 2016).

Para determinar el contenido óptimo de asfalto se debe tener en cuenta la capacidad de absorción que tiene el agregado usado en la mezcla. Debido a que se tiene que agregar suficiente asfalto en la mezcla para permitir la absorción de este, y para que además se puedan cubrir las partículas con una película adecuada de asfalto (ni muy gruesa ni muy fina). Los técnicos hablan de dos tipos de asfalto cuando se refieren al asfalto absorbido y al no absorbido: contenido total de asfalto y contenido efectivo de asfalto. El contenido total de asfalto es la cantidad de asfalto que debe ser adicionada a la mezcla para producir las cualidades deseadas en la mezcla. El contenido efectivo de asfalto es el volumen de asfalto no absorbido por el agregado; es la cantidad de asfalto que forma una película ligante efectiva sobre la superficie de los agregados. El contenido efectivo de asfalto se obtiene al restar la cantidad absorbida de asfalto del contenido total de asfalto (Hernández & Ramírez, 2016).

### **2.2.3. Propiedades Consideradas en el Diseño de Mezclas**

Una buena mezcla asfáltica en caliente tiene un correcto desempeño debido a que es diseñada, fabricada y colocada de manera que logra obtener las propiedades deseadas. Las propiedades que contribuyen a la buena calidad de pavimentos de mezclas en caliente son: la estabilidad, la durabilidad, la impermeabilidad, la trabajabilidad, la flexibilidad, la resistencia a la fatiga y la resistencia al deslizamiento.

Garantizar que la mezcla de pavimentación posea estas propiedades es el objetivo principal del procedimiento de diseño de mezclas. De tal manera, es importante saber que significa cada una de estas propiedades, cómo es evaluada, y que representa en términos de rendimiento del pavimento (Asphalt Institute, 2001).

#### *Estabilidad*

A la capacidad de resistir desplazamientos y deformación ante las cargas del tránsito se la conoce como estabilidad. Un pavimento con una buena estabilidad tiene la capacidad de mantener su forma y uniformidad bajo cargas repetidas, por otro lado, un pavimento inestable tiende a desarrollar ahuellamientos (canales), ondulaciones (corrugación) y otros indicios que indican cambios en la mezcla.

Para establecer los requisitos de estabilidad, en primer lugar, es necesario realizar un análisis completo de tránsito, dado que los requerimientos de estabilidad para un pavimento están en función del tránsito proyectado. Dichos requerimientos establecen que la estabilidad debe tener un valor lo suficientemente alto como para acomodar el tránsito esperado, pero no demasiado alto debido a que el pavimento aumentaría su rigidez y, por lo tanto, su durabilidad disminuiría.

La estabilidad de una mezcla depende de la fricción y la cohesión interna. La fricción interna en las partículas de agregado está relacionada directamente con la forma y textura superficial de los áridos. La cohesión es el resultado de la capacidad ligante del asfalto. Una buena capacidad de fricción y cohesión interna, en la mezcla, evita que las partículas de agregado se desplacen unas respecto a otras debido a las fuerzas ejercidas por el tráfico.

Es decir, una mayor estabilidad se consigue empleando partículas de agregado de forma angular y textura superficial áspera.

En el caso de que no exista disponibilidad de agregados con características de alta fricción interna, se sugiere usar mezclas más económicas, en los sectores donde se espere tráfico liviano, utilizando agregados con valores menores de fricción interna (Blanco & Montañez, 2016).

La fuerza ligante de la cohesión incrementa con la intensificación de la frecuencia de carga (tráfico). La cohesión depende también de las propiedades de viscosidad y temperatura del asfalto, es decir, a medida que la viscosidad aumenta la cohesión aumenta, o a medida que la temperatura del pavimento disminuye, la cohesión disminuye. Además, la cohesión aumenta con incrementos en el contenido de asfalto hasta cierto punto. Cuando se sobrepasa este punto, los aumentos en el contenido de asfalto producen una película demasiado gruesa sobre las partículas de agregado, lo cual tiene como consecuencia la pérdida de fricción entre partículas (Asphalt Institute, 2001).

Existen diversas causas y efectos que se asocian a una estabilidad insuficiente en el pavimento, estos se resumen en la Tabla 1.

*Tabla 1. Causas y Efectos de Inestabilidad en el Pavimento. (Asphalt Institute, 2001)*

Causas	Efectos
Exceso de asfalto en la mezcla	Ondulaciones, ahuellamientos y afloramiento o exudación.
Exceso de arena de tamaño medio en la mezcla	Baja resistencia durante la compactación y posteriormente, durante un cierto tiempo, dificultad para la compactación.
Agregado redondeado sin, o con pocas, superficies trituradas	Ahuellamiento y canalización.

### *Durabilidad*

La durabilidad de un pavimento es su habilidad para resistir factores tales como la desintegración del agregado, cambios en las propiedades de asfalto (polimerización y oxidación), y separación de las películas de asfalto. Estos factores pueden ser el resultado de la acción del clima, el tránsito, o una combinación de ambos.

Generalmente, la durabilidad de una mezcla se puede mejorar de tres diferentes maneras. Estas son: usando la mayor cantidad posible de asfalto, usando una graduación densa de agregado resistente a la separación, y diseñando y compactando la mezcla para obtener la máxima impermeabilidad.

Una mayor cantidad posible de asfalto aumenta la durabilidad debido a que las películas gruesas de asfalto no se envejecen o endurecen tan rápido como lo harían las películas delgadas. En efecto, el asfalto mantiene, por un mayor tiempo, sus características originales. Además, el máximo contenido posible de asfalto sella eficazmente un gran porcentaje de vacíos interconectados en el pavimento, haciendo difícil la penetración del aire y del agua. Desde luego, es primordial dejar un cierto porcentaje de vacíos en el pavimento para permitir la expansión del asfalto cuando existan aumentos considerables de temperatura. Una graduación densa de agregado firme, duro, contribuye, de tres maneras, a la durabilidad del pavimento. Un agregado firme y duro resiste la desintegración bajo las cargas del tránsito. Un agregado resistente a la separación resiste la acción del agua y el tránsito, las cuales tienden a separar la película de asfalto de las partículas de agregado, conduciendo a la desintegración del pavimento. La resistencia de una mezcla a la separación puede ser mejorada, bajo ciertas condiciones, mediante el uso de compuestos adhesivos, o rellenos como la cal hidratada.

El ingreso de aire y agua en el pavimento se puede disminuir si se realiza un correcto diseño y compactación de la mezcla para brindar al pavimento la mayor impermeabilidad posible (Blanco & Montañez, 2016).

Existen diversas causas y efectos con una baja durabilidad del pavimento, estos se indican en la Tabla 2.

*Tabla 2. Causas y Efectos de la Durabilidad. (Asphalt Institute, 2001).*

Causas	Efectos
Bajo contenido de asfaltos	Endurecimiento rápido del asfalto y desintegración por pérdida del agregado.
Alto contenido de vacíos debido al diseño o falta de compactación	Endurecimiento temprano del asfalto seguido por agrietamiento o desintegración.
Agregados susceptibles al agua (Hidrófilos)	Películas de asfalto se desprenden del agregado dejando un pavimento desgastado o desintegrado.



### *Impermeabilidad*

La impermeabilidad es la capacidad que tiene un pavimento ante la intrusión de aire y agua hacia su interior, o a través de él. Esta propiedad está directamente relacionada con el contenido de vacíos de la mezcla compactada. Aunque el contenido de vacíos es una indicación del paso potencial de aire y agua a través de un pavimento, la naturaleza de estos vacíos es muy importante. El grado de impermeabilidad está determinado por el tamaño de los vacíos, sin importar si están o no conectados, y por el acceso que tienen a la superficie del pavimento. Aunque la impermeabilidad es importante para la durabilidad de las mezclas compactadas, virtualmente todas las mezclas asfálticas usadas en la construcción de carreteras tienen cierto grado de permeabilidad. Esto es aceptable, siempre y cuando la permeabilidad esté dentro de los límites especificados (Blanco & Montañez, 2016).

Al igual que los otros parámetros, la permeabilidad tiene sus causas y efectos en el pavimento los cuales se muestran en la Tabla 3.

*Tabla 3. Causas y Efectos de la Permeabilidad. (Asphalt Institute, 2001).*

Causas	Efectos
Bajo contenido de asfaltos	Las películas delgadas de asfalto causan tempranamente, un envejecimiento y una desintegración de la mezcla.
Alto contenido de vacíos debido al diseño o falta de compactación	El agua y el aire pueden entrar fácilmente en el pavimento, causando oxidación y desintegración de la mezcla.
Agregados susceptibles al agua (Hidrófilos)	Resultará en vacíos altos en el pavimento, lo cual conducirá a la infiltración de agua y baja estabilidad.

### *Trabajabilidad*

La trabajabilidad se refiere a la facilidad con que una mezcla de pavimentación puede ser colocada y compactada. Las mezclas que poseen buena trabajabilidad son fáciles de colocar y compactar; mientras que aquellas con mala trabajabilidad presentan dificultad en los procesos de colocación y compactación. Se puede obtener una mejor trabajabilidad al modificar los parámetros de mezcla, el tipo de agregado, y/o su granulometría.

Las mezclas de densidad gruesa tienden a segregarse durante su manejo, y también pueden ser difíciles de compactar. A través de mezclas de prueba en el laboratorio puede ser posible adicionar agregado fino, y tal vez asfalto, a una mezcla gruesa, para volverla más trabajable. En tal caso se deberá tener cierto cuidado para garantizar que la mezcla modificada cumpla con los otros criterios de diseño, tales como contenido de vacíos y estabilidad.

Un alto contenido de relleno podría dificultar también la trabajabilidad, ocasionando que la mezcla se vuelva muy viscosa, dificultando el proceso de compactación.

Las mezclas tienen alta deformabilidad o trabajabilidad se conocen como mezclas tiernas. La inestabilidad de estas mezclas es demasiado alta como para ser colocadas y compactadas apropiadamente. Generalmente, son el producto de una falta de relleno mineral, demasiada arena de tamaño mediano, partículas lisas y redondeadas de agregado, y/o demasiada humedad en la mezcla.

La temperatura es una propiedad de la mezcla que puede afectar o facilitar la trabajabilidad debido a que está relacionada directamente con la viscosidad del asfalto. Es decir, una temperatura demasiado baja hará que la mezcla sea poco trabajable, mientras que una temperatura demasiado alta podrá hacer que la mezcla se vuelva tierna (Blanco & Montañez, 2016).

La proporción de asfalto, así como su grado, pueden afectar la trabajabilidad de la mezcla generando efectos que se explican en la Tabla 4.

Tabla 4. Causas y Efectos de Problemas en la Trabajabilidad. (Asphalt Institute, 2001)

Causas	Efectos
Tamaño máximo de partícula gruesa	Las películas delgadas de asfalto causarán tempranamente, un envejecimiento y una desintegración de la mezcla
Demasiado agregado grueso	El agua y el aire pueden entrar fácilmente en el pavimento, causando oxidación y desintegración de la mezcla.
Temperatura muy baja de mezcla	Resultará en vacíos altos en el pavimento, lo cual conducirá a la infiltración de agua y baja estabilidad.
Demasiada arena de tamaño medio	La mezcla se desplazará bajo la compactadora y permanecerá tierna o blanda
Bajo contenido de relleno mineral	Mezcla tierna, altamente permeable.
Alto contenido de relleno mineral	Mezcla muy viscosa, difícil de manejar, poco durable.

### *Flexibilidad*

Es la capacidad que presenta un pavimento asfáltico para acomodarse, sin agrietarse, a movimientos y asentamientos graduales de la subrasante. Esta es una característica deseable en todo pavimento asfáltico debido a que todas las subrasantes tienden a asentarse (bajo cargas) o expandirse (por expansión del suelo) (Hernández & Ramírez, 2016).

Una mezcla asfáltica de granulometría abierta con alto contenido de asfalto, por lo general, tiene una mayor flexibilidad que una mezcla densamente graduada y con bajo contenido de asfalto. En ciertos casos los requerimientos de flexibilidad tienen discordancia con los requisitos de estabilidad, por lo cual se debe encontrar un equilibrio de los mismos (Fajardo & Vergaray, 2014).

### *Resistencia a la Fatiga*

Se entiende como la resistencia a la flexión repetida bajo las cargas de tránsito. Investigaciones demuestran, que el contenido de vacíos de asfalto y la



viscosidad del mismo tienen un efecto significativo sobre la resistencia a la fatiga. Mientras aumente el porcentaje de vacíos en un pavimento, por motivos de diseño o por falta de compactación, la resistencia a la fatiga del pavimento, es decir el periodo de tiempo durante el cual un pavimento en servicio es adecuadamente resistente a la fatiga, disminuye. De la misma manera, un pavimento que contiene asfalto que ha envejecido y endurecido considerablemente tiene una resistencia menor a la fatiga.

Las propiedades de resistencia y espesor de un pavimento, y la capacidad de soporte de la subrasante, tienen influencia considerable en la vida del pavimento y con la prevención del agrietamiento debido a las cargas de tránsito. Los pavimentos de gran espesor sobre subrasantes resistentes no se flexionan tanto, bajo las cargas, como los pavimentos delgados o aquellos que se encuentran sobre subrasantes débiles (Blanco & Montañez, 2016)

La mala resistencia a la fatiga tiene efectos en el pavimento los cuales se encuentran en Tabla 5.

*Tabla 5. Causas y Efectos de la Mala Resistencia a la Fatiga. (Asphalt Institute, 2001)*

Causas	Efectos
Bajo contenido de asfaltos	Agrietamiento por fatiga.
Vacíos altos de diseño	Envejecimiento temprano del asfalto, seguido por agrietamiento por fatiga.
Falta de compactación	Envejecimiento temprano del asfalto, seguido por agrietamiento por fatiga.
Espesor inadecuado de pavimento	Demasiada flexión seguida por agrietamiento por fatiga.

### *Resistencia al Deslizamiento*

Es la propiedad de una superficie de pavimento de reducir el deslizamiento o resbalamiento de las ruedas de los vehículos, principalmente cuando la superficie se encuentre húmeda. Para obtener una buena resistencia al deslizamiento, el neumático debe ser capaz de mantener contacto con las partículas de agregado en vez de rodar sobre una película de agua en la superficie del pavimento (hidroplaneo).

Una superficie de pavimento con una alta rugosidad tendrá mayor oposición al deslizamiento que una superficie lisa. La mejor resistencia al deslizamiento se obtiene con agregado de textura áspera y además estos agregados deben resistir el pulimiento (alisamiento) bajo el tránsito. (Blanco & Montañez, 2016).

Las mezclas con baja estabilidad con tendencia a deformarse o a exudar (flujo de asfalto a la superficie) presentan problemas graves de resistencia al deslizamiento como los indicados en la Tabla 6.

Tabla 6. Causas y Efectos de Poca Resistencia al Deslizamiento. (Asphalt Institute, 2001)

Causas	Efectos
Exceso de asfalto	Exudación, poca resistencia al deslizamiento
Agregado mal graduado o con mala textura	Pavimento liso, posibilidad de hidroplaneo.
Agregado pulido en la mezcla	Poca resistencia al deslizamiento.

### 2.3. Mezclas Asfálticas en Caliente con Incorporación de Polvo de Caucho de Neumáticos Fuera de Uso

El reciclaje de neumáticos fuera de uso es un tema relativamente nuevo transformándose en la materia prima de una industria moderna fuera y dentro del país. No así la incorporación del caucho reciclado de llanta dentro de la estructura de pavimento flexible, ya que en algunos países se aplica este método empezando en 1960, pero dentro del país se desconoce una aplicación práctica.

La mezcla asfáltica en caliente con incorporación de polvo de caucho de neumáticos fuera de uso está compuesta por asfalto y caucho vulcanizado desechado y reciclado.

El caucho es proveniente de llantas de camiones y automóviles teniendo estas diferentes proporciones de caucho natural y sintético, generalmente los neumáticos de automóviles están compuestos de un 16 a 20% de caucho natural y de 26 al 31% de caucho sintético, en cuanto a los camiones, sus neumáticos están compuestos de al menos 31 al 33% de caucho natural y de 16 al 21% de caucho sintético (BRIDGESTONE, 2010).

Teniendo en cuenta que el polvo de caucho es el elemento primordial a incorporar en la mezcla asfáltica, se debe conocer su origen así como su obtención.

#### 2.3.1. Polvo de Caucho

El polvo de caucho es el componente que se obtiene del proceso de reciclaje de las llantas. El proceso de reencauche permite su obtención, en este caso la banda de rodadura de las llantas a reencauchar es el componente triturado dentro de la planta para su conversión en polvo.

##### *Neumáticos*

Un neumático es una pieza toroidal de caucho que se coloca en las ruedas de diversos vehículos y máquinas. El principal componente es el caucho, que es casi la mitad de su peso, y puede ser de dos tipos: natural o sintético. El caucho natural normalmente le proporciona elasticidad al neumático, mientras que el sintético lo que aporta es estabilidad térmica.

El caucho natural se obtiene a partir de un fluido lechoso de color blanco, conocido como látex, que corresponde a la savia de varias plantas específicas. La principal fuente comercial de látex son las euforbiáceas del género *Hevea*, que contienen entre un 30 a un 40% de caucho. Por otro lado, los cauchos producidos sintéticamente se obtienen por reacciones químicas, conocidas como polimerización, a partir de determinados hidrocarburos insaturados.

Durante la fabricación del neumático, los cauchos se someten al proceso de vulcanización consistente en entrelazar las cadenas de polímeros con

moléculas de azufre mediante la acción de altas presiones y temperaturas. Los enlaces así formados son muy estables lo que hace que el proceso de desvulcanización sea difícil. Esta es la principal causa por la cual no es posible reciclar neumáticos desechados para la fabricación de neumáticos nuevos.

Otro componente de los neumáticos que entra en proporciones altas, es el negro de carbón, que sirve como carga de refuerzo y para mejorar la resistencia de los cauchos a la oxidación. El acero y material textil constituyen el tercer y cuarto componente en magnitud del neumático, con la misión de ser el esqueleto del mismo y soportar y transmitir las cargas y esfuerzos que se producen sobre él durante la circulación de los vehículos. El óxido de zinc, el azufre y otra serie de productos químicos, que actúan como catalizadores, plastificantes, adhesivos, etc., terminan de dar la composición al neumático.

La clasificación de los neumáticos se hace generalmente según el tipo de vehículos que los utiliza. Se ha estimado que un 80% de los neumáticos desechados proceden de automóviles o camionetas (peso aproximado de 8 kg), un 20% de vehículos pesados (peso aproximado de 65 kg), y alrededor del 1% restante son neumáticos especiales para motocicletas, aviones, equipos de construcción u otros (Verdezoto, 2016).

#### *Obtención del Polvo de Caucho*

En el mercado existen varias plantas que se especializan en el reciclaje de las llantas, como: DURALLANTA S.A, ISOLLANTA CIA. LTDA. y ANDINA DE LLANTAS. Algunas de estas tienen diferentes diseños para adaptarse a los requerimientos que se le va dar al grano de caucho, en donde debe primar la calidad del material.

La utilización en mezclas asfálticas en caliente, precisa que el caucho reciclado esté en forma de polvo; un material constituido por partículas finas de caucho natural y sintético vulcanizado, de tamaños inferiores a 2.3 mm, obtenido triturando los neumáticos fuera de uso hasta el tamaño deseado y separando los metales, tejidos (fibras textiles) y otras impurezas que puedan incorporar (CEDEX, 2007).

Para la obtención de este polvo de caucho se siguen cuatro pasos:

- Recepción de neumáticos a reencauchar (materia prima)
- Inspección inicial
- Buffeado
- Tamizado

#### *Recepción de Neumáticos a Reencauchar (Materia Prima)*

La recepción de la materia prima dentro de la planta consta de la recepción de carcasas (cuerpo del neumático). Los neumáticos usados son transportados a la planta por medio de camiones, los cuales son descargados por personal de bodega de manera manual. Estos son apilados en el área de recepción de carcasas uno sobre otro en columnas, y separándolos en dos grupos, dependiendo si son llantas radiales o llantas convencionales (Figura 5) (Arias, 2012).



*Figura 5. Carcasas Clasificadas en Planta.*

### *Inspección Inicial*

Antes de realizar la inspección inicial, los neumáticos se clasifican en radiales y en convencionales, los convencionales son dirigidos en grupos de 30 a 35 carcasas a la sección de autoclave, con el fin de ser calentados durante 1h a una temperatura de 190 °F, para identificar fallas estructurales en la carcasa, que de otro modo no serían visibles.

Luego de esta operación de calentar los neumáticos pasan a la inspección inicial, caso contrario sucede con los neumáticos radiales que no necesitan de calentamiento si no que pasan directamente a la operación de inspección.

Esta operación se realiza por medio de una revisión minuciosa tanto interna como externa de la carcasa, con el fin de asegurar en esta primera instancia que se cumplan las condiciones o requisitos necesarios de reencauchabilidad. El Inspector busca cada inconformidad ya sean cortes, penetraciones, grietas, cualquier otra herida en el cuerpo de la carcasa o alguna falla estructural que pueda presentar. Una buena inspección es esencial para una buena calidad de reencauche.

Durante este proceso se determina si la carcasa es apta o no para el reencauche. En caso de que la carcasa no cumpla con las condiciones establecidas, se llena una ficha (Figura 6) en la que se le indica al cliente las razones que inhabilitan un buen reencauche, ya que atentaría con la calidad del producto y la seguridad del cliente, estas carcasas no aptas se apilan en una sección distinta como se puede apreciar en la Figura 7 (Arias, 2012).

**CAUSAS PARA RECHAZAR CARCASAS**

**DISTINGUIDO CLIENTE:**

POR SU SEGURIDAD HACEMOS DEVOLUCIÓN DE SU LLANTA ENVIADA A REENCACHAR POR LA SIGUIENTE CAUSA:

- 1 ☐ Area de la pestaña deteriorada
- 2 ☐ Pestaña con alambres expuestos
- 3 ☐ Corte y/o rotura en el lateral
- 4 ☐ Llanta reseca con agrietamiento
- 5 ☐ Soplo bajo el rodamiento
- 6 ☐ Cortado por objeto punzante
- 7 ☐ Desgaste excesivo breaker expuesto
- 8 ☐ Perforaciones en la corona
- 9 ☐ Reparación fuera del límite permisible
- 10 ☐ Soplo entre pliegos
- 11 ☐ Fatiga de cuerdas primer pliegue
- 12 ☐ Carcasa rota por impacto
- 13 ☐ Rodada con baja presión
- 14 ☐ Exceso de reparaciones
- 15 ☐ Oxidación / Contaminación en los breakers
- 16 ☐ Misceláneos

**GARANTÍAS:**

- 1.- Isollanta Cia. Ltda. garantiza que sus llantas reencachadas al frío fueron procesadas bajo el Sistema de Gestión de Calidad ISO 9001 y la Norma INEN 2582.
- 2.- La garantía aplica en función al desprendimiento de la banda de rodamiento.
- 3.- La Empresa NO garantiza el mal uso de las llantas reencachadas o fallas causadas por éstos, sean carcassas entregadas por los clientes o vendidas por la fábrica.

**NOTA:** La llanta podrá ser raspada y no procesada a cuenta y riesgo del cliente.

Figura 6. Ficha de Causas para Rechazar Carcasas.



Figura 7. Carcasas Rechazadas.

### Buffeado

En esta parte se procede a retirar el labrado original de la banda de rodadura de la carcasa. La máquina raspadora (Figura 8) funciona con una serie de cuchillas que raspan la superficie de la carcasa como se puede observar en la Figura 9, mientras la misma gira, dejándola con la medida de circunferencia y ancho de banda correcta, devolviéndole la redondez a la carcasa, pero además prepara la superficie para la nueva banda de rodamiento.





*Figura 8. Máquina de Buffeado.*



*Figura 9. Cuchillas de la Máquina de Buffeado.*

El polvo de caucho que se genera como único residuo en este proceso es aspirado por la misma máquina mediante un tubo (Figura 10) y almacenado en un contenedor ubicado en la parte posterior de la estación de buffeado (Figura 11). En ISOLLANTA se obtienen diariamente 2400 kg de GCR de tamaño de grano variado.



*Figura 10. Tubo de Aspiración de la Máquina de Buffeado.*



*Figura 11. Tanque de Almacenamiento de Polvo de Caucho.*

### Tamizado

El tamizado o cribado del polvo de caucho que se obtiene del proceso anterior se realiza a través de cribas de tamizado estas cribas son cajas de diferentes tamaños equipadas con una o varias rejillas con diferentes tamices. Se instalan con una ligera pendiente, que junto con las vibraciones provoca que vaya fluyendo las partículas de mayor tamaño sobre la malla, mientras que las de menor tamaño que los orificios pasan cayendo a la malla inferior o al fondo de la criba para seguir o concluir el proceso de clasificación respectivamente (Carpio & Medina, 2013).

Existen canales de salida de las partículas de caucho por los cuales se purifica de los restos de fibras metálicas que pueden existir en el producto final como se ve en la Figura 12.



*Figura 12. Salida del Polvo de Caucho desde la Criba.*

### *Tipo de Caucho*

El tipo de caucho utilizado en esta investigación es polvo de caucho triturado a partir del proceso de reciclaje de neumáticos de automóviles y camiones, proporcionado por ISOLLANTA S.A. que es una empresa de la ciudad. La forma de obtención de este material es mediante el proceso de raspado y tamizado de las bandas de rodadura de los neumáticos en la cual interviene un proceso de limpieza de las fibras metálicas a través de filtración y magnetismo.

El producto generado presenta alta homogeneidad y mantiene las propiedades físicas de la composición original, esto se puede apreciar en la Figura 13



*Figura 13. Polvo de Caucho Utilizado.*



### *Tamaño de las Partículas de Caucho*

La granulometría del caucho puede variar con el proceso de producción, principalmente en función de los equipos y de la temperatura de molienda (Heitzman, 1993). El caucho utilizado en esta investigación está compuesto de partículas que pasan el tamiz #10 (abertura 2 mm) y se retienen en el tamiz #200 (abertura 75  $\mu$ m)

### *Contenido de Caucho*

La norma ASTM D-6114: A Standard Specification for Asphalt Rubber Binder, guía los puntos básicos para la modificación del betún asfáltico por vía húmeda y vía seca. El asfalto convencional puede ser modificado por la adición del 15 al 20% del polvo de caucho, si se utiliza la vía húmeda y del 1 al 3% si se realiza por la vía seca (ASTM, 1997).

### *Técnicas de Incorporación en Mezclas Asfálticas*

La modificación de una mezcla asfáltica mediante la incorporación de polvo de caucho proveniente de neumáticos fuera de uso, se puede realizar mediante dos diferentes métodos, denominados vía húmeda y vía seca. Estos procedimientos se diferencian, además de la forma de ejecución, en el contenido de polvo de caucho que se utiliza para preparar la mezcla asfáltica (Verdezoto, 2016).

### Proceso por Vía Húmeda

En la vía húmeda se fabrican los ligantes añadiendo polvo de caucho a un betún asfáltico. Cuando el polvo de caucho se incorpora a un betún a elevada temperatura, las partículas de caucho se reblandecen, absorben los componentes más ligeros del betún y se expanden. Con el hinchamiento disminuye la distancia entre partículas y el ligante se hace más viscoso, lo que es deseable para algunas aplicaciones de los betunes (CEDEX, 2007).

Esto se ilustra en la Figura 14.



Figura 14. Esquema de Incorporación del Polvo de Caucho al Asfalto por Vía Húmeda. (Navarro, 2013)

### Proceso por Vía Seca

En el método por vía seca el polvo de caucho se agrega directamente en el mezclador de la central de fabricación de mezclas bituminosas a manera de un árido más. Dentro del proceso por vía seca se pueden diferenciar dos técnicas, según el tamaño máximo del polvo de caucho. La primera utiliza tamaños máximos elevados, de hasta 2 mm. Como la superficie específica del polvo es reducida y el periodo de interacción es limitado, no hay tiempo suficiente para que la maduración se desarrolle en toda la masa de las partículas más gruesas del caucho. Por tanto, el polvo de caucho actúa como un sistema de dos componentes en el que las partículas más finas (principalmente las que pasan por el tamiz 0.5 mm) se mezclan con el betún a elevada temperatura y alteran su reología mediante un proceso similar al de vía húmeda. Por otro lado, las partículas gruesas se comportan como un árido elastomérico dentro de la estructura mineral de la mezcla asfáltica, aunque superficialmente también reacciona con el betún y se crea una interfase betún/caucho que junta ambos materiales (CEDEX, 2007).

Esto se ilustra en la Figura 15.



Figura 15. Esquema de Incorporación del Polvo de Caucho al Asfalto por Vía Seca. (Navarro, 2013)

### Ventajas Técnicas de la Incorporación del Polvo de Caucho a una Mezcla Asfáltica

La adición de polvo de caucho a un asfalto (vía húmeda) o a una mezcla asfáltica (vía seca) tiene dos efectos principales (Navarro, 2013):

- El polvo de caucho actúa como espesante, aumentando la viscosidad del ligante. En las mezclas asfálticas esto permite envolver los áridos con películas más gruesas de asfalto sin que se produzcan escurrimientos o exudaciones.
- La adición de polvo de caucho modifica la reología de los asfaltos, de manera que aumentan su elasticidad y resiliencia a temperaturas elevadas y disminuye la susceptibilidad térmica.

### *Ventajas Ambientales de la Incorporación del Polvo de Caucho a una Mezcla Asfáltica*

Las principales ventajas ambientales que se derivan del empleo de polvo de neumático en los materiales asfálticos por vía húmeda o vía seca son las siguientes (Navarro, 2013):

- Se reciclan y reduce el volumen de neumáticos fuera de uso depositados en vertederos y en lugares desconocidos o no autorizados. El empleo de residuos permite a su vez ahorros en recursos naturales. En la técnica de las mezclas fabricadas por vía húmeda con porcentajes altos de incorporación de polvo de caucho (del orden del 20% respecto al peso del asfalto), se estima un aprovechamiento de 350 neumáticos por kilómetro de pista y por cada centímetro de espesor de mezcla asfáltica. Esta cifra es del orden de 75 a 150 en las otras técnicas, por vía húmeda o vía seca, con menores porcentajes de incorporación (entre 5 y 15% respecto al peso del asfalto).
- Su empleo en mezclas asfálticas permite reducir el nivel sonoro de rodadura. Las reducciones observadas son del orden de 3 a 4 dB respecto a las mezclas asfálticas convencionales.
- Las mezclas asfálticas fabricadas con polvo de caucho pueden reciclarse en el futuro, cuando se agote su capacidad de servicio.

### *Propiedades Físicas y Químicas del Polvo de Caucho*

Las especificaciones sobre composición química tienen como función principal asegurar que el material proviene del reciclado de neumáticos fuera de uso. La Norma Ecuatoriana de Vialidad (NEVI-12) exige que las cenizas no sobrepasen límites específicos. Por otro lado, las propiedades físicas que se especifican son las siguientes (Instituto Ecuatoriano de Vialidad, 2012):

- El tamaño máximo y la granulometría de las partículas son los parámetros que tienen gran influencia en el comportamiento de la mezcla.
- La densidad relativa de las partículas de caucho, determinada según UNE 53526, que debe estar comprendida en el intervalo  $1.15 \pm 0.05$ . Esta propiedad permite identificar el caucho de neumáticos frente a otros tipos.
- El contenido de agua, que debe ser menor que 0.75 %. Su determinación se tiene que realizar de acuerdo a la Norma ASTM D2216-98, a excepción de lo que se indica acerca de la temperatura de calentamiento en la estufa, que debe ser de  $105^{\circ}\text{C} \pm 5^{\circ}\text{C}$ . Se limita la humedad, porque puede producir espumas durante la fabricación.
- El contenido en contaminantes, como metales, impurezas y textiles, que se limita para evitar deterioros en los equipos de manejo y pérdidas de características en los productos fabricados (mezclas). Estas limitaciones son:
  - El contenido de materiales ferromagnéticos no debe ser mayor que 0.01% en peso del polvo de caucho.

- El contenido de materiales textiles no debe ser mayor que 0.5% en peso del polvo de caucho.
- El contenido de cualquier otro tipo de impurezas, tales como arena, madera, vidrio no debe ser mayor que 0.25% en peso del polvo de caucho.

### **3. Métodos de Ensayo y Control**

A continuación, se describen los métodos de ensayo empleados en la presente investigación y los procedimientos de revisión para evaluar los materiales y métodos correspondientes.

En el Ecuador, los métodos de ensayo para caracterizar las mezclas asfálticas y los materiales componentes básicos, se encuentran descritos en la Norma Ecuatoriana Vial (NEVI-12) del Ministerio de Transporte y Obras Públicas (MTO). Estos ensayos se realizaron en el laboratorio del Centro Tecnológico de la Construcción, gracias a un convenio inter institucional entre esta institución y la Universidad de Cuenca.

#### **3.1. Materiales Constituyentes**

Las propiedades y calidad de cada capa asfáltica dependen, además de su espesor y de una correcta construcción, de la composición y de los materiales que constituyen la mezcla asfáltica establecida. Es por este motivo, que los materiales que conforman cada una de las capas de un pavimento flexible deben cumplir requisitos mínimos de calidad, para que puedan ser aptos y satisfagan los requerimientos establecidos en el diseño.

En el caso de las mezclas asfálticas en caliente convencionales, se debe realizar el control de los áridos pétreos y el cemento asfáltico que van a ser utilizados, y en el caso de la presente investigación, es decir, las mezclas asfálticas en caliente con incorporación de caucho reciclado, se debe evaluar también la calidad del caucho que conforma parte de la mezcla.

##### **3.1.1. Áridos**

Se debe verificar el cumplimiento de los requisitos mínimos que se exigen para áridos en mezclas asfálticas en caliente según la Norma Ecuatoriana de Vialidad. (Instituto Ecuatoriano de Vialidad, 2012)

###### **3.1.1.1. Granulometría**

Los diferentes tipos de áridos, de acuerdo a su uso dentro de la mezcla en el pavimento, deben cumplir con la normativa especificada en el Capítulo 800, Sección 811 (Agregados para Mezclas Bituminosas) del Instituto Ecuatoriano de Vialidad, 2012, para que desempeñen su función de manera correcta.

Al ser una investigación orientada a la fabricación de mezclas asfálticas en caliente bajo la metodología Marshall para capas de rodadura, se deberán cumplir con los requisitos de graduación presentados en la Tabla 7.

Tabla 7. Requisitos de Graduación para Agregados en Mezclas Asfálticas Marshall. (Instituto Ecuatoriano de Vialidad, 2012)

Tamaño Tamiz [mm]	Tamaño Nominal Máximo del Agregado [mm]			
	19.0	12.5	9.5	4.75
	Material más fino que cada tamiz (malla cuadrada), % que pasa en peso			
25.0	100			
19.0	90 a 100	100		
12.5		90 a 100	100	
9.5	56 a 80		90 a 100	100
4.75	35 a 65	44 a 74	55 a 85	80 a 100
2.36	23 a 49	28 a 58	32 a 67	65 a 100
1.18				40 a 80
0.6				25 a 65
0.3	5 a 19	5 a 21	7 a 23	7 a 40
0.15				3 a 20
0.075	2 a 8	2 a 10	2 a 10	2 a 10

#### Abrasión o Desgaste.

Los agregados deben resistir el desgaste irreversible y la degradación durante su fabricación, colocación y compactación de las obras de pavimentación, es decir, durante toda la vida de servicio del pavimento, por lo que es fundamental emplear este método para determinar la resistencia al desgaste, empleando la máquina de Los Ángeles (Vega, 2016).

Los requisitos para agregado grueso establecidos en la NEVI, 2012 se basan en la norma AASHTO T 104: Standard Method of Test for Soundness of Aggregate by Use of Sodium Sulfate or Magnesium Sulfate. Los áridos deben cumplir con los criterios presentados en la Tabla 8.

Tabla 8. Propiedades de Origen Requeridas para Agregados Gruesos en Mezclas Asfálticas Densas. (Instituto Ecuatoriano de Vialidad, 2012)

Norma	Descripción	Criterio
AASHTO T 96	Abrasión e Impacto en la Máquina de Los Ángeles	$\leq 40 \%$
AASHTO T 104	Resistencia al Uso de Sulfato de Sodio, 5 ciclos	$\leq 12 \%$
AASHTO T 104	Resistencia al Uso de Sulfato de Magnesio, 5 ciclos	$\leq 18 \%$
AASHTO T 112	Terrones de Arcilla y Partículas Deleznables	$\leq 1 \%$

La granulometría a usar para la elaboración de las muestras de mezcla asfáltica está especificada en la Tabla 9.

Tabla 9. Granulometría Utilizada para la Elaboración de Muestras.

Tamaño Tamiz [mm]	Limites Porcentaje Pasante	Límites Elegidos Porcentaje Pasante
25.0	100	100
19.0	90 a 100	100
12.5		
9.5	56 a 80	78
4.75	35 a 65	65
2.36	23 a 49	40
1.18		
0.6		
0.3	5 a 19	12
0.15		
0.075	2 a 8	2

### 3.1.2. Cemento Asfáltico

Se debe verificar el cumplimiento de los requisitos mínimos que se exigen para productos derivados del petróleo a ser utilizados en mezclas asfálticas en caliente según el Instituto Ecuatoriano de Normalización (Instituto Ecuatoriano de Normalización, 2014).

#### *Cemento Asfáltico Convencional*

Existen varios tipos de cemento asfáltico, se clasifican por el grado de penetración basados en su dureza y consistencia, mediante ensayos de penetración. Se los divide por su grado de viscosidad, es decir, de acuerdo a la consistencia presentada al exponerse a determinadas temperaturas (Vega, 2016).

La norma que establece los requisitos y métodos de ensayo que debe cumplir los asfaltos a ser utilizados como material ligante en obras de construcción y de mantenimiento de pavimentos es la NTE INEN 2515, 2014: Productos Derivados del Petróleo. Cemento Asfáltico (Clasificación por Viscosidad) Requisitos. Los requisitos físicos que deben cumplir se presentan en la Tabla 10.

Tabla 10. Requisitos para Asfalto Cemento gradual Viscosidad a 60 °C a Base de Asfalto Original. (Instituto Ecuatoriano de Normalización, 2010)

Ensayo	Unidad	Grado de Viscosidad										Norma de Ensayo
		AC - 6		AC - 10		AC - 20		AC - 30		AC - 42		
		Min.	Max	Min.	Max	Min.	Max	Min.	Max	Min.	Max	
Viscosidad absoluta, 60 °C	Pa s	60 ± 20		100 ± 20		200 ± 40		300 ± 60		420 ± 60		ASTMD 2171
Viscosidad cinemática, 135 °C	mm²s⁻¹	175	--	250	--	300	--	350	--	400	--	ASTMD 2170
Punto de Inflamación	°C	177	--	219	--	232	--	232	--	232	--	NTE INEN 808
w, Solubilidad en tricloroetileno	%	99.0	--	99.0	--	99.0	--	99.0	--	99.0	--	NTE INEN 915
Gravedad específica 25 °C/25 °C		Informe		Informe		Informe		Informe		Informe		ASTMD 70
Índice de Penetración		-1.5 a +1		-1.5 a +1		-1.5 a +1		-1.5 a +1		-1.5 a +1		ASTM D5/D5M
Residuo de ensayos de película fina en horno rotatorio:												
Viscosidad, 60 °C	Pa s	--	300	--	500	--	800	--	1200	--	2000	ASTMD 2171
Cambio de masa	% w/w	--	1.5	--	1.0	--	1.0	--	1.0	--	1.0	ASTMD 2872
Ductilidad, 25 °C [77 °F], 5 cm/min	cm	100	--	75	--	50	--	40	--	25	--	NTE INEN 916

### Cemento Asfáltico Modificado con Caucho

El asfalto modificado con caucho es una combinación entre el asfalto tradicional usado en pavimentación y el material triturado de las bandas de rodadura de los neumáticos a reencauchar.

La mezcla asfalto – caucho debe cumplir con los requisitos físicos presentados en la Tabla 11. Las pruebas de ensayo tienen el objetivo de medir el grado de modificación del cemento asfáltico debido a la mezcla con caucho reciclado de los neumáticos.

Tabla 11. Requerimientos Físicos para las Mezclas de Asfalto-Caucho. (Instituto Ecuatoriano de Normalización, 2013)

Requisitos	Unidad		Designación de la mezcla			Método de Ensayo
			Tipo I	Tipo II	Tipo III	
Viscosidad Aparente a 175 °C	Pa. s	Min.	1.5	1.5	1.5	ASTM D2196, Método A. Modificado
		Max.	5.0	5.0	5.0	
Penetración a 25 °C, 100g, 5s	1/10 mm	Min.	25	25	50	NTE INEN 917
		Max.	75	75	100	
Penetración a 4 °C, 200g, 60s	1/10 mm	Min.	10	15	25	NTE INEN 917
Punto de reblandecimiento	°C	Min.	57	54	52	NTE INEN 920
Resiliencia a 25 °C	%	Min.	25	20	10	ASTM D5329
Punto de inflamación	°C	Min.	232	232	232	NTE INEN 80 8
Residuo de película delgada al horno	--	--	--	--	--	ASTM D 1754
Retención de penetración, 4°C, % original	1/10 mm	Min.	75	75	75	NTE INEN 917



La norma que establece los requisitos y procedimientos de ensayo que debe cumplir las mezclas asfálticas modificadas con polvo de caucho que se utilizan como material ligante en la construcción y mantenimiento de pavimentos es la NTE INEN 2680, 2013: Productos Derivados del Petróleo. Asfalto Modificado con Caucho Reciclado. Requisitos e Inspección (Instituto Ecuatoriano de Normalización, 2013).

### 3.1.3. Grano de Caucho Reciclado (GCR)

El GCR podrá ser el producto del raspado de la banda de rodadura de las llantas de vehículos pesados o vehículos livianos en el proceso de reencauche. El GCR deberá ser uniforme, libre de material metálico, textiles u otros contaminantes, y deberá estar libre de humedad. Todo el GCR debe tener un tamaño de grano inferior a 0.60 mm (pasante del tamiz No. 30). Se recomienda que una vez se encuentre el material en obra, almacenarlo en una tolva para su disposición.

Al no contar con normativa nacional para la incorporación del GCR en una mezcla asfáltica, se utilizó la norma dada por el Instituto Nacional de Vías de Colombia, en su Capítulo 4. Artículo 413: Suministro de Cemento Asfáltico Modificado con Grano de Caucho Reciclado, el cual, proporciona las características que debe cumplir el GCR para su implementación en pavimentos. La Tabla 12 corresponde a las características físicas que debe cumplir el GCR, mientras que la Tabla 13 indica la granulometría que debe cumplir el GCR para su uso en pavimentos.

Tabla 12. Características Físicas del Grano Reciclado de Caucho. (Instituto Nacional de Vías, 2013)

Características	Requisito
Humedad con respecto a la masa total de la mezcla	0.75% máximo
Gravedad específica	$1.15 \pm 0.05$
Contenido de metales no ferrosos	No Debe Haber Presencia Visible
Contenido de metales ferrosos en masa	0.01% máximo
Contenido de fibras en masa Para mezcla en caliente	0.5% máximo
Contenido de fibra en masa para riegos	0.1% máximo
Contenido de polvo mineral	4% máximo
Contenido total de otros elementos extraños	0.25% máximo

Tabla 13. Tamaño de Grano de Caucho. (Instituto Nacional de Vías, 2013)

Tamiz	Porcentaje que pasa	
	Tipo A	Tipo B
No. 8	100	-
No. 10	95 – 100	100
No. 16	0 – 10	65 – 100
No. 30	-	20 – 100
No. 50	-	0 – 45
No. 200	-	0 – 5

Debido a ciertas limitaciones como la falta de equipos para realizar ensayos más complejos y falta de infraestructura adecuada, el único ensayo que se realizó corresponde a un ensayo granulométrico para comprobar el tamaño de grano del polvo de caucho.

### 3.2. Diseño de Mezclas Asfálticas en Caliente

El objetivo del diseño de una mezcla asfáltica en caliente es encontrar el mejor balance entre la estabilidad, durabilidad, trabajabilidad e impermeabilidad, además de propiedades adicionales y necesarias de acuerdo a su función en la estructura general del pavimento (Vega, 2016).

Para tal efecto, se determina el contenido óptimo de asfalto para una combinación específica de áridos, aditivos y materiales que se puedan agregar como agregado, que le otorgue a la mezcla asfáltica las propiedades requeridas. El porcentaje óptimo de asfalto está en función, en su mayoría, de las propiedades del agregado, como la estabilidad, capacidad de absorción y granulometría. Es necesario también que la mezcla cumpla con un porcentaje de vacíos para absorber la consolidación producto del tráfico.

El proceso de dosificación y sus especificaciones varían según el tipo de mezcla asfáltica requerida.

#### 3.2.1. Mezclas Asfálticas Convencionales

Las mezclas asfálticas convencionales siguen una metodología específica para determinar el contenido óptimo de asfalto, a esta metodología se conoce como Método Marshall el cual es aplicable solamente a mezclas que contengan agregados con un tamaño máximo absoluto igual o inferior a 25 mm (Garnica, Delgado, Gómez, Alonso, & Alarcón, 2004).

Para el correcto desarrollo del método se requiere la fabricación de probetas.

##### *Confección de las Probetas*

Las probetas son muestras cilíndricas normalizadas de 63.5 mm (2.5”) de altura y 101.6 mm (4”) de diámetro, a las cuales se les incorporan diferentes porcentajes de ligante. Las probetas con estas dimensiones reciben el nombre de probetas Marshall, para su elaboración se sigue la norma ASTM D6926: Standard Practice for Preparation of Asphalt Mixture Specimens Using Marshall Apparatus.

Para obtener las dimensiones requeridas en las probetas se realiza la mezcla con 1200 g de áridos según la dosificación de diseño. Suelen utilizarse al menos cinco contenidos de cemento asfáltico (porcentaje referido al peso del agregado), variando uno y otro en 0.5 puntos porcentuales y con al menos dos contenidos de asfalto bajo y sobre el óptimo esperado. Para cada contenido de ligante, se deben fabricar a lo menos tres probetas, las probetas terminadas se ilustran en la Figura 16.

Cabe recalcar que para la presente investigación se fabricaron 60 muestras, variando el porcentaje de asfalto y de caucho. Es decir, 15 probetas con distintos porcentajes de asfalto y 0 % de caucho, 15 con distintos porcentajes de asfalto y 10 % de caucho, 15 con distintos porcentajes de asfalto y 15 % de caucho y 15 distintos porcentajes de asfalto y 20 % de caucho.



*Figura 16. Probetas con Asfalto sin Modificar.*

Las probetas son fabricadas de acuerdo a un procedimiento normalizado de calentamiento, mezclado y compactación según la norma ASTM D1561. La temperatura a la cual se realiza el mezclado y la compactación dependen de las propiedades del cemento asfáltico que se utilice para fabricar la mezcla, y se definen según el rango de viscosidades necesarias para realizar tales procesos. Es decir que a cierta temperatura se tiene que alcanzar una viscosidad deseada para la manejabilidad de la mezcla asfáltica.

La compactación dentro de los moldes se realiza por impacto utilizando el martillo de compactación Marshall. El cual es un elemento de acero, de base plana y circular de 100 mm de diámetro, con un peso de 4.54 kg, con una altura de caída de 18 pulgadas. Las probetas son compactadas con una energía de compactación de cierto número de golpes por cara, o como se especifique para el tipo de tráfico. En nuestro caso se diseñó para tráfico pesado a lo cual corresponden 75 golpes en cada cara de la muestra (Cervera, 2016).

### **3.2.2. Mezclas Asfálticas con Incorporación de Polvo de Caucho por Vía Húmeda.**

El diseño de una mezcla asfáltica modificada con polvo de caucho por vía húmeda representa más dificultad que una mezcla asfáltica convencional debido a la mayor cantidad de parámetros que se deben determinar y a que todos están interrelacionados (variables que definen el proceso de digestión). (CEDEX, 2007)

Dado que la incorporación de caucho a una mezcla modifica en cierto grado las propiedades del asfalto según las condiciones en que se ejecute el proceso de digestión del caucho, se hace prioritario definir las condiciones para efectuar este proceso de manera efectiva.

Así, a partir de la dosificación de áridos y polvo de caucho, de acuerdo a sus respectivas granulometrías, se deben determinar una temperatura y un tiempo de digestión mínimos.

### **3.2.3. Procedimiento para la Confección de Probetas**

El procedimiento para la fabricación de la mezcla modificada con GCR en laboratorio, no difiere en comparación con el método tradicional empleado para la elaboración de la mezcla convencional sin caucho, salvo en la temperatura y tiempo de digestión que requiere este tipo de mezcla asfáltica antes de la compactación:

El procedimiento seguido fue:

1. Se secaron los agregados hasta un peso constante en el horno. La temperatura de secado fue 110 °C. Después se enfriaron a temperatura ambiente y se cribaron de acuerdo a los tamaños deseados y la granulometría propuesta de la Tabla 9. La clasificación y elaboración de los lotes de agregado se puede observar en la Figura 17.



*Figura 17. Preparación de Lotes de Agregado para la Elaboración de Briquetas.*

2. Se preparó la liga de asfalto también propuesta, es decir con los porcentajes establecidos (5, 5.5, 6, 6.5 y 7 %). Para esto se determinó el peso de asfalto que necesitaba cada muestra, así mismo el porcentaje de caucho (10, 15 y 20%) con relación al peso de asfalto que se tenía que agregar.
3. Se calentó el asfalto y se agregó el caucho necesario para cada proporción.
4. Se mezcló el caucho con el asfalto por 60 minutos (periodo de digestión) con ayuda de una batidora a aproximadamente 425 revoluciones por minuto, como se aprecia en la Figura 18.



*Figura 18. Mezcla de Asfalto y Caucho.*

5. Se verificó que la temperatura del ligante se encuentre entre los 155 y 175 °C con un termómetro (Figura 18). Esta temperatura es la recomendada para alcanzar los

parámetros de viscosidad requeridos, es decir, apta para la mezcla con los agregados.

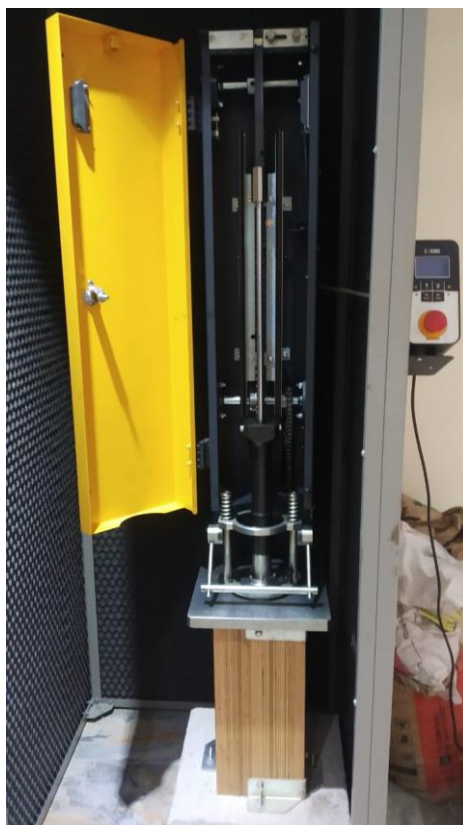
6. Se colocó un lote de agregados, que se encontraban a una temperatura de 20 °C mayor a la del betún, en una bandeja, se homogeneizó la muestra. Se formó un volcán con el agregado mezclado en seco y se colocó en una balanza, Se tomó la proporción necesaria de asfalto, a la temperatura de mezclado, y se agregó a la mezcla.
7. Se mezclaron los agregados y la liga rápidamente hasta que las partículas de agregado estén lo suficientemente cubiertos por asfalto como en la Figura 19. Se tuvo cuidado de no perder parte de la mezcla durante el mezclado.



*Figura 19. Preparación de la Mezcla.*

8. Se limpió el molde y la cara del martillo de compactación. Se calentó el molde y se colocó papel absorbente en el fondo del molde. Se colocó la mezcla dentro y se la uniformizó con una espátula y se colocó otro pedazo de papel encima de la mezcla.
9. Se colocó el molde en el pedestal de compactación y se aplicaron 75 golpes (debido a que se diseñó para tráfico pesado). Se retiró la placa base y el collarín para invertir el molde. Se rearmó con la placa base y el collarín y se aplicó un igual número de golpes en la otra cara de la muestra. Esto con ayuda del martillo de compactación que se muestra en la Figura 20.





*Figura 20. Martillo y Pedestal de Compactación.*

10. Después de la compactación, se retiró el molde completo. Se desarmó el collarín y la placa base. El anillo con la muestra se dejó enfriar para poder desmoldarlo.
11. El espécimen se retiró del molde con ayuda del martillo de compactación, dando pequeños y suaves golpes.
12. Se repitió el proceso para los especímenes requeridos para los ensayos posteriormente descritos.
13. Se dejaron los especímenes en una superficie plana y lisa, dejándolos enfriar a temperatura ambiente, algunos especímenes se observan en la Figura 21.



*Figura 21. Especímenes con 10% de GCR.*

### 3.3. Caracterización de Mezclas Asfálticas

La caracterización de mezclas asfálticas a realizarse en la presente investigación es a través de tres métodos:

- Método Marshall.
- Ensayo de Densidad Máxima Teórica (Ensayo Rice).
- Ensayo de Abrasión mediante el Método de la Máquina de los Ángeles.

#### 3.3.1. Método Marshall

Ensayo para determinar valores de estabilidad y deformabilidad de los pavimentos asfálticos ideado por Bruce G. Marshall del Departamento de Caminos del Estado de Mississippi (EEUU) (Construmática, s.f.).

##### *Estabilidad*

La estabilidad es la carga máxima resistida por la probeta multiplicada por el factor de corrección correspondiente, que se encuentra en función del volumen y del espesor de la probeta. (Construmática, s.f.).

##### *Flujo*

El flujo es la disminución del diámetro que experimenta la probeta entre el inicio de carga y el instante de rotura, expresada en mm con una aproximación de 0.1 mm (Construmática, s.f.).

#### 3.3.2. Ensayo RICE

Es un ensayo que sirve para determinar el peso específico máximo de mezclas asfálticas. El ensayo se lo realiza a la mezcla, o sea no compactada e indica el peso específico de la mezcla sin vacíos. El resultado permite determinar la cantidad de cemento asfáltico absorbido por los agregados de la mezcla para así conocer la cantidad total o efectiva de cemento asfáltico requerida para la misma (AASHTO, 2012).

#### 3.3.3. Ensayo de Abrasión mediante el Método de la Máquina de los Ángeles.

La finalidad del ensayo es determinar el valor de la pérdida por desgaste de las mezclas bituminosas empleando la Máquina de los Ángeles, este procedimiento se aplica a mezclas bituminosas fabricadas en caliente y de granulometría abierta.

Este ensayo permite valorar indirectamente la cohesión, trabazón, así como la resistencia a la disgregación de la mezcla, ante los efectos abrasivos y de succión originados por el tráfico (CEDEX, 2000).

### 3.4. Trabajo de Laboratorio

El trabajo de laboratorio consiste en una serie de ensayos realizados a los distintos materiales y muestras explicados en la sección anterior. Esto con el fin de verificar el cumplimiento de sus propiedades y que sean aptos para la fabricación de las muestras.

#### 3.4.1. Áridos

Se aplicaron ensayos a los agregados conseguidos en ROOKAZUL CIA. LTDA para conocer sus propiedades. Estas propiedades son:

- Humedad
- Tamaño de grano

- Desgaste
- Densidad
- Humedad Óptima

### *Humedad*

La norma utilizada para describir este ensayo es la ASTM D 2216: Standard Test Methods for Laboratory Determination of Water (Moisture) Content of Soil and Rock by Mass.

Este ensayo consiste en la determinación del contenido de agua mediante su masa, en laboratorio, de un suelo, roca y materiales similares, donde la reducción de la masa por secado es debido a la pérdida de agua.

### *Contenido de Agua Respecto a la Masa (Del Material)*

Es la relación de la masa del agua, contenida en los poros del suelo o la roca, respecto a la masa sólida de las partículas del material expresada en porcentaje. La temperatura de secado para determinar estas masas es de  $110^{\circ}\text{C} \pm 5^{\circ}\text{C}$ .

### *Masa Seca Constante (Del Material)*

Es el estado que ha alcanzado el agua del espécimen cuyo contenido en un calentamiento posterior causa o podría causar menos del 1.0 % o 0.1 % de pérdida de masa. El tiempo necesario para obtener la masa seca constante puede variar a causa de numerosos factores (ASTM, 2010).

### *Procedimiento*

1. Se tomó una muestra de material y se la colocó en una tara.
2. Se pesó la muestra y la tara y se registró como  $H_1$  (g)
3. Se secó en el horno por 24 horas a una temperatura de  $110^{\circ}\text{C}$ .
4. Se repitió el proceso para otras tres muestras y se la registró como  $H_n$  (g).
5. Se obtuvo los porcentajes de humedad y el promedio.

### *Granulometría*

Las normas utilizadas en este ensayo de agregados son la ASTM C136M: Standard Test Method for Sieve Analysis of Fine and Coarse Aggregates y la ASTM C117: Standard Test Method for Materials Finer than  $75\text{ }\mu\text{m}$  (No. 200) Sieve in Mineral Aggregates by Washing.

Por granulometría o análisis granulométrico de un agregado se entenderá todo procedimiento manual o mecánico por medio del cual se pueda separar las partículas constitutivas del agregado según tamaños, de tal manera que se puedan conocer las cantidades en peso de cada tamaño que aporta el peso total. Para separar por tamaños se utilizan las mallas de diferentes aberturas, las cuales proporcionan el tamaño máximo de agregado en cada una de ellas. En la práctica, los pesos de cada tamaño se expresan como porcentajes retenidos en cada malla con respecto al total de la muestra. Estos porcentajes retenidos se calculan tanto parciales como acumulados, en cada malla, ya que



con estos últimos se procede a trazar la gráfica de valores de material (granulometría) (ASTM, 2010) (ASTM, 2017).

#### Procedimiento

1. Se extrajo y se preparó la muestra según las normas ASTM D75 y ASTM C702 respectivamente.
2. Se mezcló la muestra extraída en estado húmedo y se la secó por 24 horas en el horno a una temperatura de 110 °C.
3. Se homogeneizó la muestra total y se consiguió una masa total de 10000 gramos.
4. Se seleccionó el juego de tamices (2", 1 1/2", 1", 3/4", 1/2", 3/8", #4) del laboratorio y se los dispuso en aberturas decrecientes sobre la máquina tamizadora, además al colocarlos se verificó que se encuentren limpios y secos. Este paso se puede verificar en la Figura 22



*Figura 22. Disposición de Tamices.*

5. Se realizó un tamizado mecánico por tres minutos, después por intervalos de 30 segundos y se finalizó con un tamizado manual.
6. Se determinó la masa final del material retenido en cada tamiz y del material que pasa por el tamiz de menor abertura (#4) recogido en el fondo.
7. Después de esto se seleccionó el material para el análisis granulométrico para áridos finos, para esto se tomaron 852 gramos y se repitió el proceso desde el paso 4. Al igual se dispuso la serie de tamices (#4, #8, #10, #16, #30, #50, #100 y #200) en la máquina tamizadora, esto se observa en la Figura 23.



Figura 23. Disposición de Tamices en la Máquina Tamizadora.

8. Ya realizado el análisis granulométrico para áridos finos se utilizó la norma AASHTO C117 para determinar el material fino menor que  $75\ \mu\text{m}$ . Del fondo del juego de tamices para árido fino se tomó como muestra una porción de aquel material.
9. Se secó el material para evitar humedad y tener una aproximación exacta de la masa seca.
10. Se determinó y registró la masa inicial de la muestra de ensayo en estado seco.
11. Se colocó sobre el tamiz No. 200 y se procedió a lavar bajo el chorro de agua del grifo para así eliminar el material fino, pero evitando la pérdida de material retenido por el tamiz.
12. Se colocó el material retenido después del lavado, en una bandeja y se procedió con el secado en el horno por 24 horas a una temperatura de  $110\ ^\circ\text{C}$ .
13. Se pesó y se registró la masa de la muestra ya seca como Peso Después del Lavado (g).

### *Abrasión*

La norma utilizada para describir este ensayo es la ASTM C131: Standard Test Method for Resistance to Degradation of Small-Size Coarse Aggregate by Abrasion and Impact in the Los Angeles Machine.

La abrasión se conoce como un indicador de la calidad relativa o la competencia de varias fuentes de agregados que tienen una composición mineral similar. Los resultados no permiten hacer automáticamente comparaciones válidas entre fuentes de agregados de diferente origen, composición y estructura. Los límites de especificaciones basados en este ensayo deben asignarse con extremo cuidado, considerando los tipos de agregados disponibles y su historial de desempeño en aplicaciones específicas anteriores (COGUANOR, 2014).

### Procedimiento

1. Se extrajo y se preparó la muestra según las normas ASTM D75 y ASTM C702 respectivamente.
2. Se determinó la granulometría de la muestra de acuerdo con el método presentado en la norma ASTM C136M
3. Se procedió a determinar la muestra de ensayo mediante el lavado y el secado hasta masa constante en un horno a temperatura de 110 °C.
4. Se tamizó la muestra obtenida de acuerdo a la norma del paso 2.
5. Se separó el material clasificado, en el paso 2, en las partes requeridas para el ensayo.
6. Se eligió de la norma el grado de ensaye que mejor represente la granulometría de la muestra, esto con el fin de obtener una mezcla de áridos que sea apta para su ensayo.
7. Se separó los tamaños de las fracciones correspondientes al grado elegido, en este caso separar 2509 g de base que pasa el tamiz  $\frac{3}{4}$ " pero queda retenido en el tamiz  $\frac{1}{2}$ " y 2509 g de base que pasa el tamiz  $\frac{1}{2}$ " pero queda retenido en el tamiz  $\frac{3}{8}$ ". Dando un total de 5018 gramos de muestra.
8. Se registró la masa inicial de material por ensayar como masa inicial de la muestra  $M_o$  aproximando a gramos.
9. Se colocó la masa inicial de material en la Máquina de Los Ángeles y ensayó de acuerdo al grado elegido con el número de esferas igual a 11 (debido a la falta de esferas) y 500 revoluciones.
10. Al completarse el número de revoluciones correspondiente, se sacó el material de la máquina evitando pérdidas y contaminaciones, esto se puede observar en la Figura 24.



Figura 24. Material Obtenido al Sacar del Tambor de la Máquina de los Ángeles.

11. Se efectuó un primer tamizado por el tamiz N° 8 para evitar el daño del tamiz N° 12.
12. Se tamizó el material que pasó el tamiz N° 8 en el tamiz N° 12 según el procedimiento de tamizado final propuesto en la norma ASTM C136M.
13. Se acumuló todo el material retenido en ambos tamices.
14. Se lavó el material y se secó en el horno hasta que la masa sea constante a 110 °C.
15. Se pesó y registró el material retenido seco como masa final de la muestra aproximando a 1 gramo.

#### *Peso Específico y Absorción*

La densidad es una de las principales propiedades físicas de los áridos, esta propiedad tiene una influencia en el comportamiento y funcionamiento cuando se las usa en la construcción de pavimentos. Por lo tanto, el objetivo del ensayo es determinar el peso específico (densidad) de una muestra de árido grueso y fino.

Las normas utilizadas en este ensayo de agregados son la ASTM C127: Standard Test Method for Relative Density (Specific Gravity) and Absorption of Coarse Aggregate y la ASTM C128: Standard Test Method for Relative Density (Specific Gravity) and Absorption of Fine Aggregate

Cuando se examina la aptitud física de los agregados, es conveniente conocer y valorar las características propias de cada material, entre las cuales se puede nombrar la densidad, el peso específico y la absorción. Para poder medir las características anteriores es importante entender que todos los agregados son porosos hasta cierto punto, lo que posibilita la entrada de agua en los espacios de los poros. Un agregado húmedo puede entonces tener agua tanto en su interior como en el exterior.

Se conoce como absorción al incremento en masa del agregado debido a la penetración de agua en los poros de las partículas, durante un período de tiempo prescrito, sin incluir el agua adherida en la superficie de las partículas, expresado como porcentaje de la masa seca. La densidad, de un material se define como la masa por unidad de volumen de un material, expresada en  $\text{kg/m}^3$  ( $\text{lb/ft}^3$ ).

La densidad relativa (gravedad específica) es la característica generalmente usada para el cálculo del volumen ocupado por el agregado en mezclas de concreto de cemento Pórtland, concreto bituminoso y otras mezclas que son proporcionadas o analizadas en base a un volumen absoluto. También es utilizada en el cálculo de vacíos en los agregados en el método de ensayo ASTM C 29/C 29M.

La densidad aparente y la densidad relativa aparente (gravedad específica aparente) pertenece al material sólido de partículas constituyentes, no incluyendo el espacio de poros entre partículas, que es accesible al agua. Este valor no es ampliamente usado en la tecnología de agregados de construcción.

Los valores de absorción se usan para calcular el cambio en la masa de un agregado debido al agua absorbida en los espacios de poro en el interior de las partículas constituyentes, comparado con la condición seca, cuando se considera que el agregado ha estado en contacto con agua por un período suficiente para poder satisfacer la absorción potencial (Universidad Centroamericana "José Simeón Cañas").

#### Procedimiento

##### *Árido Grueso:*

1. Se extrajo una muestra de árido y se preparó según las normas ASTM D75 y ASTM C702 respectivamente.
2. Se eliminó por tamizado las partículas menores a 2.36 mm, hasta obtener la cantidad mínima de muestra según el tamaño máximo nominal de las partículas. En nuestro caso 4847.2 g para la muestra 1 y 4853.8 para la muestra 2.
3. Se lavó la muestra para remover el polvo o cualquier material contaminante en la superficie de las partículas, este paso se muestra en la Figura 25



*Figura 25. Material Grueso Lavado.*

4. Se secó el material en el horno hasta que la masa sea constante a una temperatura de 110 °C.
5. Se enfrió el material a temperatura ambiente por un tiempo de 24.
6. Se sumergió la muestra en agua a temperatura constante, y dejó reposar el árido por un tiempo de 24.
7. Se secó las partículas de árido individualmente rodándolas por un paño húmedo como en la Figura 26, hasta dejar la muestra en estado saturado superficialmente seco. Este proceso se debe realizar en el menor tiempo posible.





Figura 26. Secado Superficial de las Partículas de Agregado.

8. Se pesó el árido en estado saturado superficialmente seco en una balanza con una precisión de 1 gramo, y registro como  $M_{ss}$  (gramos).
9. Se introdujo la muestra en la canastilla de la balanza hidrostática y se sumergió en agua a 21 °C, por un periodo de 3 minutos.
10. Se determinó la masa sumergida del árido usando una balanza hidrostática con una precisión de 1 gramo y registro su masa como  $M_{sum}$  (gramos).
11. Se retiró el material de la canastilla y seco en un horno a una temperatura de 110 °C hasta que la masa sea constante.
12. Se determinó la masa del árido seco usando una balanza con una precisión de 1 gramo y registró su masa como  $M_s$  (gramos).

#### Árido Fino:

1. Se extrajo una muestra de árido y se preparó según las normas ASTM D75 y ASTM C702 respectivamente.
2. Se eliminó por tamizado las partículas mayores a 2.36 mm, hasta obtener una muestra de 500 gramos.
3. Se secó la muestra en el horno hasta que la masa sea constante a una temperatura de 110 °C por 24 horas.
4. Se dejó en reposo el árido fino en agua a temperatura ambiente por un tiempo de 24 horas.
5. Se secó la muestra de árido homogéneamente hasta llevarla a una condición suelta, eliminando el exceso de agua sin aplicar fuego directamente a la misma.
6. Se colocó el árido en el molde cónico sobre una superficie lisa hasta llenarlo completamente, se compacto el árido con 25 golpes usando el respectivo pistón del cono.
7. Se removió el cono verticalmente, si el árido conserva la forma del cono la muestra se encuentra saturada superficialmente seca, se aprecia lo conseguido en la Figura 27 .Caso contrario se debe

repetir el procedimiento desde el paso 5 evitando realizar un secado excesivo de la muestra.



*Figura 27. Material en Estado SSS.*

8. Se pesó la muestra en estado saturado superficialmente seco en una balanza con una precisión de 1 gramo y registró su masa como  $M_{SSS}$  (gramos). Esta corresponde a 250.5 gramos para la muestra y 250.5 para la muestra 2.
9. Se colocó la muestra de árido en un matraz de calibración y lleno el matraz con agua a temperatura  $20 \pm 3^\circ\text{C}$  hasta alcanzar  $2/3$  del volumen del matraz.
10. Se eliminó las burbujas de aire dentro del matraz dejando reposar el matraz por 1 hora manteniendo la temperatura del agua constante, se registró la temperatura del agua. Esto se observa en la Figura 28.



*Figura 28. Matraz con Material y Agua con Temperatura Constante.*



11. Se llenó con agua a 21 °C hasta la marca de calibración y dejo reposar la muestra en el matraz.
12. Se determinó la masa del matraz que contiene la muestra y el agua en una balanza con una precisión de 0.1 gramos, se registró como Mm (gramos).
13. Se retiró el material del matraz que se dejó en reposo, evitando la pérdida de material.
14. Se colocó el material en una bandeja y seco en un horno a una temperatura de 110 °C hasta que la masa sea constante.
15. Se determinó la masa del árido seco usando una balanza con una precisión de 1 gramo y registró su masa como Ms (gramos) Se llenó el matraz solamente con agua a temperatura ambiente hasta la marca de calibración y pesar en una balanza con una precisión de 0.1 g, se registró como Ma (gramos).

#### *Humedad Óptima de Compactación*

En este ensayo se utilizó la norma ASTM D1557: Standard Test Methods For Laboratory Compaction Characteristics Of Soil Using Modified Effort (56000 ft-lbf/ft<sup>3</sup> (2700 kN-m/m<sup>3</sup>)), para realizar el ensayo de compactación.

El ensayo realizado tiene por objetivo determinar el peso unitario máximo y de la humedad óptima de una muestra de suelo.

Se denomina compactación de los suelos al proceso mecánico que tiene por objetivo mejorar las propiedades de resistencia, compresibilidad y esfuerzo-deformación de los mismos. Este proceso implica reducir los vacíos que se encuentran entre las partículas de suelo, lo que tiene como consecuencia que ocurran cambios considerables de volumen generados por la pérdida de volumen de aire de los vacíos.

La importancia de la compactación es obtener un suelo de tal manera que su estructura mecánica responda de la manera más adecuada a los esfuerzos que se presenten en una obra durante toda su vida útil (Mata, 2010).

#### Procedimiento

El método utilizado fue el “C” debido a las características granulométricas del árido utilizado, este método se encuentra detallado en el libro Fundamentos de la Ingeniería Geotécnica (Das, 1985), debido a las características obtenidas en el ensayo de granulometría, y cuyos datos de ensayo se encuentran en la Tabla 14 a continuación:

Tabla 14. Especificaciones para Ensayo de Proctor Modificado Método "C". (Das, 2013)

MÉTODO "C"		
Diámetro del molde	152.4	mm
Volumen del molde	2124	cm <sup>3</sup>
Peso del pisón	44.5	N
Altura de caída del pisón	457.2	mm
No. de golpes por capa de Suelo	56	
No. de capas de compactación	5	
Energía de compactación	2696	kN-m/m <sup>3</sup>
Suelo por usarse	Porción que pasa la malla de 19 mm. Se usa si más del 20 % por peso de material es retenido en la malla de 9.5 mm y menos del 30 % por peso retenido en la malla de 19 mm.	

1. Se determinó la humedad natural de la muestra, se tomaron tres muestras de material, se determinaron sus masas y se las colocó en el horno.
2. Se mezcló el material hasta conseguir su homogenización.
3. Se llenó el molde cilíndrico en 5 capas aplicando 56 golpes con el martillo modificado para cada capa.
4. Se retiró el collarín y con la ayuda de una espátula se enrasó el molde dejando una superficie lisa.
5. Se registra la masa del molde junto con el material compactado ( $W_{mol} + S_{ue_{hum}}$ ) en gramos, como se puede observar en la Figura 29.



Figura 29. Molde de Compactación + Muestra Compactada.

6. Con una probeta graduada y calculando previamente el volumen de agua que se asignará a cada muestra, se aumentó la humedad de las muestras siguientes para obtener humedades de 10%, 12% y 15% aproximadamente. Cada nueva muestra fue sometida al mismo proceso de compactación del paso No. 2.

7. De cada muestra ya compactada, se obtuvieron tres diferentes porciones de material (base, medio y superficie) del molde para obtener un promedio de humedades de la muestra ensayada.
8. Dado este proceso se obtuvieron los puntos para determinar la humedad óptima del material.

### 3.4.2. Betún Asfáltico

Las propiedades del betún asfáltico fueron proporcionadas por ASFALTAR E.P, las mismas que son certificadas por PETROECUADOR S.A.

Las propiedades del betún utilizado siguen las normas respectivas y sus resultados se muestran en la Tabla 23.

### 3.4.3. Polvo de Caucho

Aunque existen varios parámetros que el polvo de caucho debe cumplir, en este caso solo se analizó el tamaño de grano del material debido al impedimento de contar con los equipos especializados para los otros ensayos. Así igualmente no se puede establecer propiedades fijas para el material utilizado debido a que este es una mezcla de distintos tipos de caucho, de diferentes neumáticos que llegan a la planta.

Por lo que el procedimiento para conocer el tamaño de grano fue:

1. Se extrajo y se preparó la muestra según las normas ASTM D75 y ASTM C702 respectivamente.
2. Se homogeneizó la muestra total y se consiguió una masa total de 900 gramos.
3. Se seleccionó el juego de tamices (#4, #8, #10, #16, #30, #50, #100 y #200) del laboratorio y se los dispuso en aberturas decrecientes sobre la máquina tamizadora, además al colocarlos se verificó que se encuentren limpios y secos.
4. Se realizó un tamizado mecánico por tres minutos, luego de este tiempo se giraron los tamices y se tamizó por tres minutos también, después por intervalos de 30 segundos y se finalizó con un tamizado manual.
5. Se determinó la masa final del material retenido en cada tamiz y del material que pasa por el tamiz de menor abertura recogido en el fondo.

### 3.4.4. Mezclas Asfálticas

Para el ensayo de mezclas asfálticas se utilizaron las normas:

- ASTM D6752: Standard Test Method for Bulk Specific Gravity and Density of Compacted Bituminous Mixtures Using Automatic Vacuum Sealing Method.
- ASTM D6927: Standard Test Method for Marshall Stability and Flow of Asphalt Mixtures.
- ASTM D2041: Standard Test Method for Theoretical Maximum Specific Gravity and Density of Asphalt Mixtures.

El procedimiento se divide en tres etapas.

#### *Peso Específico de las Mezclas.*

1. Se limpió y pesó cada probeta y se registró como el peso en seco de cada una de las muestras. La limpieza se realizó con un cepillo

de acero para eliminar los restos de partículas o el polvo adherido a las probetas, esto se evidencia en la Figura 30.



*Figura 30. Limpieza de Muestras.*

2. Se pesó cada probeta en la canasta sumergiéndola al agua en la balanza hidrostática y se registró el dato como peso de la probeta en agua de cada una de las muestras a ensayar.
3. Se pesó así mismo cada probeta en estado saturado superficialmente seco, se registró este dato para cada una de las muestras.
4. Se hicieron los cálculos para determinar el peso específico de cada probeta de manera que se pueda obtener un peso específico promedio para cada porcentaje de betún asfáltico.

#### *Estabilidad y Flujo de las Mezclas.*

Este ensayo describe la medida de la resistencia al flujo plástico de muestras cilíndricas de asfalto aplicado a través del aparato Marshall (ASTM, 2015).

1. Se llevó la probeta a un baño de agua conocido como Baño María a una temperatura de  $60 \pm 1^\circ\text{C}$  durante un lapso de 30 a 40 minutos. Algunas de las muestras se pueden observar en la Figura 31.



*Figura 31. Probetas Sometidas a Baño María.*

2. Se limpió la mordaza del aparato Marshall.
3. Se sacó la probeta del agua y se secó rápidamente la superficie.

4. Se colocó la probeta en la mordaza y se centró en el aparato, se dio carga de manera que el anillo de carga empiece a presionar la mordaza, al momento que esto sucedió se encendió el dial del anillo para empezar el ensayo.
5. Se colocó el deformímetro a un lado de la mordaza como medio de medida del flujo.
6. Se aplicó la carga a la probeta a una velocidad de 2 in/min.
7. El punto de falla se define mediante la máxima lectura obtenida en el dial de carga, esta carga se conoce ya como estabilidad Marshall.
8. Se anotó la máxima deformación al alcanzar dicha carga, la lectura de este dato se denomina flujo

### *Ensayo RICE*

Este método cubre la determinación de la gravedad específica teórica máxima y densidad de mezclas bituminosas no compactadas a 25 °C (77 °F). Siguiendo la norma ASTM D2041-00: Standard Test Method for Theoretical Maximum Specific Gravity and Density of Asphalt Mixtures (ASTM, 2019).

#### Procedimiento:

1. Se preparó la mezcla asfáltica en el laboratorio utilizando agregados previamente secados en el horno.
2. Mientras la muestra estaba caliente, se desmenuzó en partículas evitando fracturar el agregado de tal manera que las partículas de la porción del agregado fino no sean mayores que alrededor de 6 mm. Se colocó la muestra directamente dentro de tazón tarado.
3. Se pesó el tazón tarado y la muestra y se registró como peso inicial. El peso utilizado para cada muestra es de 2000 gramos, esto se evidencia en la Figura 32



*Figura 32. Muestra + Tazón de Prueba. Ensayo RICE.*

4. Se agregó agua a una temperatura de aproximadamente 25 °C (77 °F) para cubrir la muestra completamente.
5. Se colocó el tazón con su tapa en el aparato de agitación mecánica y se aseguró a la superficie del aparato. Se inició el agitado e inmediatamente se empezó a remover el aire atrapado en la muestra incrementando gradualmente la presión de vacío hasta que el manómetro de presión residual lea  $3.7 \pm 0.3$  kPa ( $27.5 \pm 2.5$  mm de Hg). El vacío será alcanzado dentro de 2 minutos. Una vez que el vacío es alcanzado, se agitó por 15 min.
6. Se retiró la presión de vacío gradualmente y se procedió a obtener los datos necesarios.
7. Pesado en agua. Se colocó el tazón (sin tapa) y contenido en agua por 10 min. Entonces se determinó la masa total.
8. Pesado en aire (tazón). Lentamente se sumergió el tazón y la muestra en un baño de agua por 10 min. La tapa se colocó en el baño de agua al mismo tiempo. Se deslizó la tapa sobre el tazón sin remover el agua de tal forma de evitar algún entrapamiento de aire, entonces se presionó firmemente la tapa hacia abajo en el tazón. Se asignó la masa del tazón, tapa, agua y muestra como peso total.

#### *Ensayo de Desgaste*

Este ensayo se apega a la norma NLT-352: Caracterización de las Mezclas Bituminosas Abiertas por Medio del Ensayo Cántabro de Pérdida por Desgaste, y describe el procedimiento que debe seguirse para la determinación del valor de la pérdida por desgaste de las mezclas bituminosas, empleando la Máquina de Los Ángeles (CEDEX, 2000). Esta norma se utilizó debido a que no se cuenta con la norma dada por la American Society for Testing and Materials (ASTM).

1. Se preparó cuatro probetas para el contenido de ligante sin caucho y cuatro probetas para el que incluye el GCR.
2. Se verificó que la temperatura de ensayo se encuentre entre 15 y 30 °C, con una tolerancia máxima de  $\pm 1$  °C.
3. Se determinó la masa de cada probeta con una aproximación de 0.1 g y se registró como  $P_o$ .
4. Se introdujo una probeta en el bombo de la máquina de Los Ángeles y, sin las esferas, se hizo girar el tambor 300 veces a aproximadamente 33 revoluciones por minuto.
5. Al final, se sacó la probeta y se pesó con la misma aproximación del paso 3 y se registró como  $P_f$ . Las probetas después del ensayo se observan en la Figura 33.





*Figura 33. Muestras Ensayadas. Ensayo de Abrasión o Desgaste.*

6. El ensayo se repitió de forma idéntica con cada una de las probetas preparadas.

## 4. Análisis e Interpretación de Resultados

En el presente capítulo se presentan los resultados obtenidos en los diferentes ensayos que se realizaron, tanto para la materia prima que conforman las mezclas asfálticas, como para las mezclas asfálticas como tal.

Para una correcta comparación entre mezclas asfálticas convencionales y mezclas asfálticas con adición de grano de caucho reciclado (GCR), se partió con una mezcla patrón, para comparar las variaciones de sus propiedades, en función de los porcentajes establecidos de GCR en las mezclas modificadas.

### 4.1. Caracterización de los Materiales

Comprenden todos los materiales que conformarán las mezclas asfálticas convencionales y las mezclas asfálticas modificadas con GCR. Los ensayos fueron realizados conforme indican las normativas mencionadas en la sección Materiales Constituyentes y los procedimientos descritos en la sección Métodos de Ensayo y Control.


#### 4.1.1. Caracterización de los Agregados

Al hablar de los agregados, es primordial clasificar como agregado grueso a la porción que pasa por el tamiz No.  $\frac{3}{4}$ '' y es retenido en el tamiz No. 4. Mientras que el agregado fino, es la porción que pasa el tamiz No. 4 y es retenido en el tamiz No. 200.

#### *Humedad del Árido*

Se obtuvieron seis muestras del árido en su estado natural, se realizó el ensayo según la norma ASTM D 2216-10: Standard Test Methods for Laboratory Determination of Water (Moisture) Content of Soil and Rock by Mass, obteniéndose los resultados presentados en la Tabla 15.

Tabla 15. Humedad del Árido. Tabla de Datos y Resultados.


UNIVERSIDAD DE CUENCA						
FACULTAD DE INGENIERÍA: ESCUELA DE INGENIERÍA CIVIL						
DOSIFICIÓN OPTIMA EN PAVIMENTO FLEXIBLE DE ASFALTO Y CAUCHO UTILIZANDO MATERIALES DE LA REGIÓN						
DETERMINACIÓN DE HUMEDAD EN ÁRIDOS PÉTREOS		FECHA		28/2/2019		
Muestra	Peso Tara [g]	Peso Tara + Material Húmedo [g]	Peso Tara + Material Seco [g]	Peso Material Húmedo [g]	Peso Material Seco [g]	Humedad [%]
	1	2	3	4=2-1	5=3-1	6=100-(5/4)
M1	44	98	96	54	52	3.70%
M2	40	92	90	52	50	3.85%
M3	50	116	114	66	64	3.03%
M4	44	116	112	72	68	5.56%
M5	38	118	114	80	76	5.00%
M6	40	118	116	78	76	2.56%
HUMEDAD PROMEDIO						3.95%

El promedio de las humedades de las seis muestras ensayadas indica que el material en su estado natural tiene un porcentaje de humedad de 3.95%.

### Análisis Granulométrico

Se realizó el ensayo de análisis granulométrico según las normas ASTM C136M: Standard Test Method for Sieve Analysis of Fine and Coarse Aggregates y la ASTM C117: Standard Test Method for Materials Finer than 75  $\mu\text{m}$  (No. 200) Sieve in Mineral Aggregates by Washing, los resultados se presentan en la Tabla 16, con su curva granulométrica presentada en la Figura 34.

Tabla 16. Datos y Resultados: Ensayo Granulométrico de los Agregados.

UNIVERSIDAD DE CUENCA							
FACULTAD DE INGENIERÍA: ESCUELA DE INGENIERÍA CIVIL							
DOSIFICIÓN OPTIMA EN PAVIMENTO FLEXIBLE DE ASFALTO Y CAUCHO UTILIZANDO MATERIALES DE LA REGIÓN							
GRANULOMETRÍA DE ÁRIDOS PÉTREOS			FECHA	26/2/2019			
Tamiz	Diámetro [mm]	Peso Retenido [g]	Peso Acumulado [g]	Porcentaje Retenido [%]	Porcentaje Retenido Arreglado [%]	Porcentaje Pasante [%]	Porcentaje Pasante Arreglado [%]
2"	50	0	0	0.000	0.000	100.	100
1 1/2"	37.5	2	0	0.000	0.000	100	100
1"	25	14	14	0.14	0.14	99.86	99.86
3/4"	19	656	670	6.70	6.70	93.30	93.30
1/2"	12.5	2256	2926	29.26	29.27	70.74	70.73
3/8"	9.5	1144	4070	40.70	40.71	59.30	59.29
N.4	4.75	1552	5622	56.22	56.24	43.78	43.76
Fondo		4375	9997	99.97	100.00	0.03	0.000
N.4	4.75	12	12	1.67	1.67	43.05	43.03
N.8	2.38	242	254	35.28	35.33	28.34	28.30
N.10	2	32	286	39.72	39.78	26.39	26.36
N.16	1.19	128	414	57.50	57.58	18.61	18.56
N.30	0.59	9114	528	73.33	73.46	11.68	11.63
N.50	0.297	88	616	85.56	85.68	6.32	6.27
N.100	0.149	70	686	95.28	95.41	2.07	2.01
N.200	0.074	32	718	99.72	99.86	0.12	0.06
Pasa #200		1	719	99.86	100	0.06	0
Peso Antes del Ensayo (Árido Total) [g]			10000		Peso Antes del Lavado [g]		852
Peso Después del Ensayo (Árido Total) [g]			9997		Peso Después del Lavado [g]		720
					1		719
Error	0.0300				Error	0.138	
	Parámetros de Tamaño						
	D10	0.608		Cu	3.129		
	D30	0.972		Cc	0.817		
	D60	1.902					

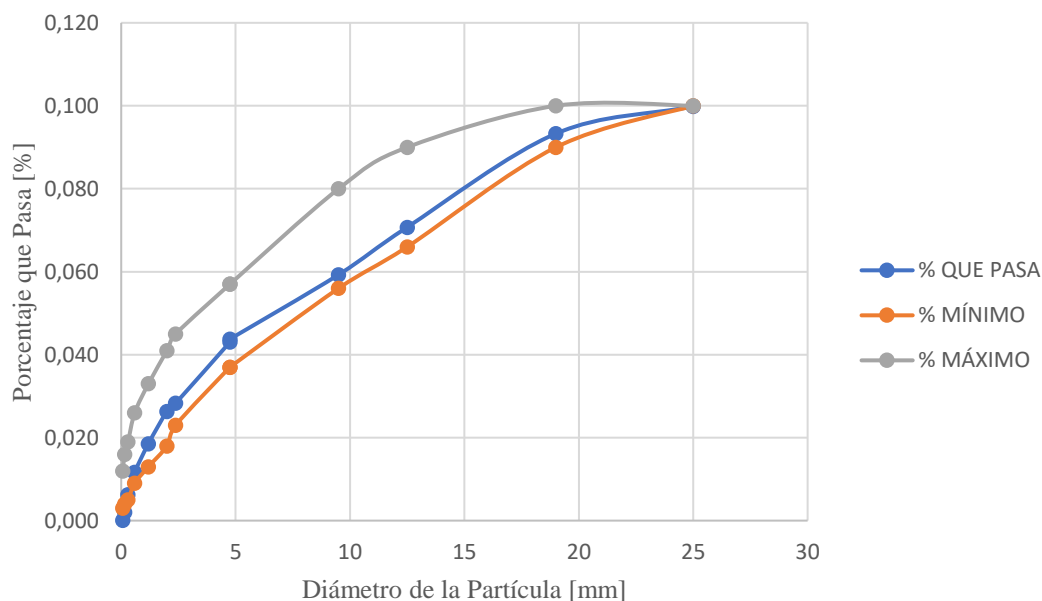


Figura 34. Curva Granulométrica de los Áridos Ensayados.

La granulometría de los áridos obtenidos en la Cantera ROOKAZUL de la provincia del Azuay presentan una curva granulométrica que cumple con los requisitos establecidos en la normativa de la NEVI, 20112, para un tamaño nominal de árido correspondiente a  $\frac{3}{4}$ '' (19 mm), siendo el árido apto para ser utilizado en mezclas asfálticas densas (Marshall).

A partir de la granulometría ensayada al árido antes mencionado y verificando que cumpla con las normas establecidas en la NEVI-12, se estableció una nueva granulometría de modo que cumpla las bandas granulométricas establecidas en la norma ASTM. La banda elegida es la perteneciente al tamaño de grano de 19 mm, los límites se observan en la Tabla 17.


Tabla 17. Tamaño de Grano para Mezclas Marshall. (Instituto Ecuatoriano de Vialidad, 2012)

Tamaño Tamiz [mm]	Tamaño Nominal Máximo del Agregado [mm]			
	19.0	12.5	9.5	4.75
	Material más fino que cada tamiz (malla cuadrada), % que pasa en peso			
25.0	100			
19.0	90 a 100	100		
12.5		90 a 100	100	
9.5	56 a 80		90 a 100	100
4.75	35 a 65	44 a 74	55 a 85	80 a 100
2.36	23 a 49	28 a 58	32 a 67	65 a 100
1.18				40 a 80
0.6				25 a 65
0.3	5 a 19	5 a 21	7 a 23	7 a 40
0.15				3 a 20
0.075	2 a 8	2 a 10	2 a 10	2 a 10

### *Abrasión de los Agregados*

El ensayo de abrasión mediante la Máquina de los Ángeles se realizó según la norma ASTM C131: Standard Test Method for Resistance to Degradation of Small-Size Coarse Aggregate by Abrasion and Impact in the Los Angeles Machine, registrándose los resultados en la Tabla 18.

*Tabla 18. Datos y Resultados: Ensayo de Resistencia a la Abrasión o Desgaste.*

UNIVERSIDAD DE CUENCA						
FACULTAD DE INGENIERÍA: ESCUELA DE INGENIERÍA CIVIL						
DOSIFICIÓN OPTIMA EN PAVIMENTO FLEXIBLE DE ASFALTO Y CAUCHO UTILIZANDO MATERIALES DE LA REGIÓN						
RESISTENCIA A LA ABRASIÓN			FECHA		28/2/2019	
Muestra Árido Grueso [g]	1	2509	Muestra Después de Ensayo + Bandeja	4	5652	Abrasión [%]
			Muestra Seca+ Bandeja [g]	5	4667	
Muestra Árido Fino [g]	2	2509	Peso Bandeja [g]	6	635	9 = (3-8) /8
			Muestra Después de Ensayo [g]	7 = 6-4	5017	
Total, Muestra Inicial [g]	3	5018	Muestra Seca [g]	8 = 6-5	4032	19.65%

Se obtuvo un resultado de 19.65% de abrasión en el agregado, cumpliendo con los requerimientos establecidos en la Norma Ecuatoriana de Vialidad (NEVI-12) en la cual indica que el porcentaje máximo permitido es del 40 %, siendo el árido apto para ser utilizado en mezclas asfálticas densas (Marshall).

### *Peso Específico y Absorción de los Agregados*

Los ensayos de peso específico y absorción de los áridos tanto grueso como fino se realizaron según las normas ASTM C127: Standard Test Method for Relative Density (Specific Gravity) and Absorption of Coarse Aggregate y la ASTM C128: Standard Test Method for Relative Density (Specific Gravity) and Absorption of Fine Aggregate, el resultado para árido fino se presenta en la Tabla 19 mientras que para árido grueso en la Tabla 20.

Tabla 19. Datos y Resultados: Ensayo de Densidad en Árido Fino

UNIVERSIDAD DE CUENCA				
FACULTAD DE INGENIERÍA: ESCUELA DE INGENIERÍA CIVIL				
DOSIFICIÓN OPTIMA EN PAVIMENTO FLEXIBLE DE ASFALTO Y CAUCHO UTILIZANDO MATERIALES DE LA REGIÓN				
DENSIDAD DE ÁRIDO FINO		FECHA	28/2/2019	
Muestra	#	1	2	
Peso del Material SSS [g]	1	250.25	250.5	
Peso del Matraz + Agua+Material SSS [g]	2	800	800	
Temperatura del Agua [°C]	3	20	20	
Peso del Matraz + Agua [g]	4	658	658	
Peso del Material Seco [g]	5	239.2	239.7	
Peso Específico del Agua [g/cm³]	6	0.999		
Muestra		1	2	Promedio
Densidad SSS	$7 = (1 / (1+4-2)) * 6$	2.309	2.306	2.308
Densidad Seca	$8 = (5 / (1+4-2)) * 6$	2.207	2.207	2.207
Densidad Aparente	$9 = (5 / (5+4-2)) * 6$	2.458	2.451	2.455
Porcentaje de Absorción	$10 = 100 - 1/5$	4.416%	4.311%	4%

Tabla 20. Datos y Resultados: Ensayo de Densidad de Árido Grueso

UNIVERSIDAD DE CUENCA							
FACULTAD DE INGENIERÍA: ESCUELA DE INGENIERÍA CIVIL							
DOSIFICIÓN OPTIMA EN PAVIMENTO FLEXIBLE DE ASFALTO Y CAUCHO UTILIZANDO MATERIALES DE LA REGIÓN							
DENSIDAD DE ÁRIDO GRUESO				FECHA	28/2/2019		
Muestra	Peso Rejilla (Aire)	Peso Rejilla (Sumergida)	Peso Muestra + Rejilla (Aire)	Peso Muestra + Rejilla (SSS)	Peso Bandeja	Peso Seco + Bandeja	Peso Seco
	1	2	3	4	5	6	7=6-5
1	1028.6	903.3	5875.8	4039.9	596	5341.5	4745.5
2			5882.4	4045.2	602	5345.6	4743.6
Muestra	Peso SSS	Peso Sumergido	Muestra	1	2	Promedio	
	8=3-1	9=4-2	Densidad SSS	2.834	2.835	2.834	
1	4847.2	3136.6	Densidad Seca	2.774	2.771	2.773	
2	4853.8	3141.9	Densidad Aparente	2.950	2.958	2.954	
			Porcentaje de Absorción	2.143%	2.270%	2.21%	

### Humedad Óptima de Compactación

El ensayo de Humedad Óptima de Compactación, mediante el método de Proctor Modificado fue realizado según la norma ASTM D1557: Standard Test Methods For Laboratory Compaction Characteristics of Soil Using Modified Effort (56000 ft-lbf/ft³ (2700 kN-m/m³)), los resultados se presentan en la Tabla 21.



Tabla 21. Datos y Resultados. Ensayo de Humedad Óptima.

UNIVERSIDAD DE CUENCA							
FACULTAD DE INGENIERÍA: ESCUELA DE INGENIERÍA CIVIL							
DOSIFICIÓN OPTIMA EN PAVIMENTO FLEXIBLE DE ASFALTO Y CAUCHO UTILIZANDO MATERIALES DE LA REGIÓN							
ENSAYO DE HUMEDAD ÓPTIMA			FECHA		26/2/2019		
HUMEDAD NATURAL							
Tara	Mhum + tara (g)	Msec + tara (g)	Tara (g)	Mhum (g)	Msec (g)	% Hum	
1	122	116	50	72	66	9.091%	
2	158	152	50	108	102	5.882%	
3	138	132	42	96	90	6.667%	
						7.213%	
Características del Molde							
No.				89921.00			
P. Total [g]				9130.00			
P. Collarín [g]				1638.00			
P. Molde [g]				3806.00			
P. Base [g]				3686.00			
D. Molde [cm]				15.17			
H. Molde [cm]				11.72			
D. Collarín [cm]				15.00			
H. Collarín [cm]				6.00			
Vol. Molde [cm³]				2116.91			

Primer Ensayo									
P. Molde + P. Material + P. Base [g]	P. Material [g]	Densidad [g/cm <sup>3</sup> ]	Muestra	Tara	Mhum + tara [g]	Msec + tara [g]	Mhum [g]	Msec [g]	Humedad [%]
11830	4338.00	2.049	M1	50	76	74	26	24	8.333%
			M2	46	106	102	60	56	7.143%
			M3	46	76	74	30	28	7.143%
PROMEDIO									7.540%

Segundo Ensayo									
P. Molde + P. Material + P. Base [g]	P. Material [g]	Densidad [g/cm <sup>3</sup> ]	Muestra	Tara	Mhum + tara [g]	Msec + tara [g]	Mhum [g]	Msec [g]	% Hum
12146	4654.00	2.198	M1	48	94	90	46	42	9.524%
			M2	54	110	104	56	50	12.00%
			M3	50	112	106	62	56	10.71%
PROMEDIO									10.74%

Tercer Ensayo
---------------

P. Molde + P. Material + P. Base [g]	P. Material [g]	Densidad [g/cm <sup>3</sup> ]	Muestra	Tara	Mhum + tara [g]	Msec + tara [g]	Mhum [g]	Msec [g]	% Hum
12362	4870.00	2.300	M1	40	78	72	38	32	18.75%
			M2	40	82	78	42	38	10.52%
			M3	50	144	136	94	86	9.302%
PROMEDIO									12.86%

Cuarto Ensayo									
P. Molde + P. Material + P. Base [g]	P. Material [g]	Densidad [g/cm <sup>3</sup> ]	Muestra	Tara	Mhum + tara [g]	Msec + tara [g]	Mhum [g]	Msec [g]	% Hum
12274	4782.00	2.258	M1	48	148	136	100	88	13.63%
			M2	50	172	162	122	112	8.929%
			M3	40	120	112	80	72	11.11%
PROMEDIO									11.22%

Quinto Ensayo									
P. Molde + P. Material + P. Base [g]	P. Material [g]	Densidad [g/cm <sup>3</sup> ]	Muestra	Tara	Mhum + tara [g]	Msec + tara [g]	Mhum [g]	Msec [g]	% Hum
12274	4718	2.229	M1	42	155	137	113	95	18.95%
			M2	48	176	161	128	113	13.27%
			M3	50	119	111	69	61	13.12%
PROMEDIO									15.11%

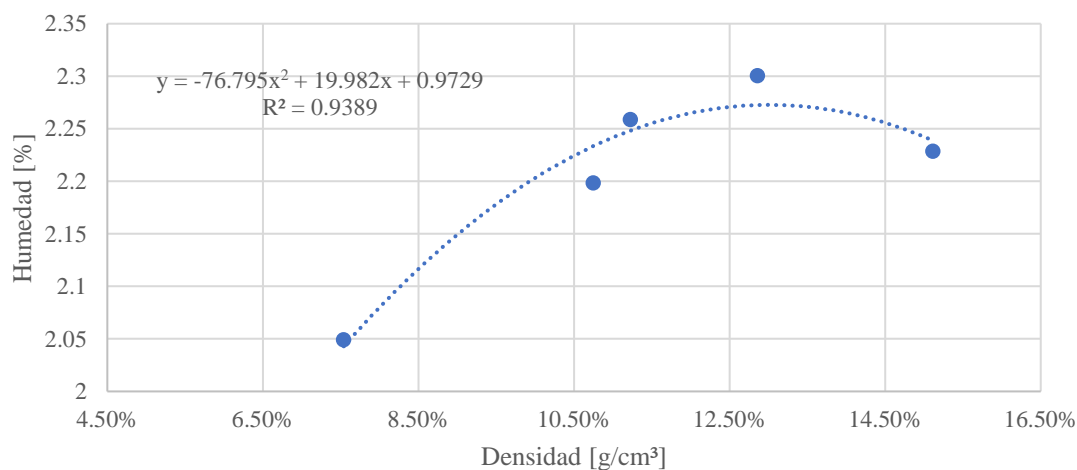


Figura 35. Curva de Humedad Óptima de Compactación.

A partir de la Figura 35, al tener la curva de tendencia con su ecuación correspondiente, se puede determinar el valor del porcentaje de humedad óptimo, obteniéndose una humedad de 13.01 %.

#### 4.1.2. Caracterización del Betún Asfáltico

El betún asfáltico utilizado es un cemento asfáltico de tipo AC-20, el cual presenta un menor grado de penetración y mayor resistencia. La empresa que proporcionó el material es ASFALTAR EP, y los ensayos de caracterización del mismo fueron realizados y avalados por PETROECUADOR S.A, siendo el laboratorio acreditado por el Servicio de Acreditación Ecuatoriano (SAE) con acreditación No. SAE LEN 13-002. Los resultados se presentan en la Tabla 22 y Tabla 23.

Tabla 22. Datos de Muestra y Análisis de Betún Asfáltico. (PETROECUADOR S.A., 2019)

Datos de la Muestra			
Origen de la Muestra	AO-V16		
Fecha de Toma de la Muestra	29/8/2019	Hora Toma de Muestra	17:00:39
Cantidad de Muestra	2000 ml		
Fecha de Recepción de Muestra	29/8/2019	Hora de Recepción de Muestra	17:05:57
Lugar Toma de Muestra	STR1A	Punto de Muestreo	Aforo de Tanque

Datos de Análisis			
Temperatura Ambiente	24 °C		
Humedad Relativa Ambiente	66.0 %HR	Presión Barométrica	101.0 kPa
Fecha de Inicio de los Ensayos	29/8/2019 17:10	Fecha Finalización de los Ensayos	29/8/2019 23:30
Fecha de Emisión del Informe	30/8/2019		


Tabla 23. Resultados de Análisis del Betún Asfáltico. (PETROECUADOR S.A., 2019)

Resultados					
Parámetro	Método	Especificación		Resultado	Unidad de Medida
	(ASTM_INEN)	Mín.	Máx.		
Viscosidad Absoluta 140 °F (60° C)	ASTM D2171_NTE INEN 810	160	240	208	Pa s
Viscosidad Cinemática 275 °F (135 °C)	ASTM D2170_NTE INEN 810/1981	300	-	368	mm <sup>2</sup> /s
Penetración 77 °F (25 °C 100 G 5s)	ASTM D5_NTE INEN 918	60	-	79	dmm
Punto de Inflamación	ASTM D92_NTE INEN 808	232	-	300	°C
Solubilidad en Tricloroetileno	ASTM D2042_NTE INEN 915	99	-	99.94	% P
Residuo de Ensayos de Película Fina en Horno Rotatorio	N/A	N/A	N/A	N/A	-
Viscosidad 60° C	ASTM D2171_NTE INEN 810	-	800	638	Pa s
Ductilidad 77 °F (25 °C) 5 cm/min	ASTM D113_NTE INEN 916	50	-	65	cm
Gravedad API a 60 °F (15.6 °C)	ASTM D1298_NTE INEN 2319	Reporte	Reporte	7.2	API
Densidad Relativa (15.6/15.6 °C)	ASTM D1298_NTE INEN 2319	Reporte	Reporte	1.0202	-
Gravedad Específica 25/25 °C	ASTM 70	Reporte	Reporte	1.01	-
Punto de Ablandamiento	ASTM D36	-	-	48.5	°C
Índice de Penetración	ASTM D5	-1.5	1	-0.4	-
Cambio de Masa	ASTM D 2872	-	1	-0.21	% P
API Observado: 14.620					
Temperatura Observada: 94.0 °C					
Observaciones:					

### 4.1.3. Caracterización del Caucho Reciclado

Para la caracterización del caucho se realizó un análisis granulométrico para determinar el tipo de caucho a incorporar en la mezcla asfáltica según su tamaño de grano. En la Tabla 24 se presentan los resultados y en la Figura 36 su curva granulométrica. Se establecieron dos ensayos granulométricos con el fin de comparar el tamaño de grano que contienen las partículas de dos lotes distintos.

Tabla 24. Datos y Resultados. Ensayo de Determinación del Tamaño de Grano de Caucho Reciclado.

UNIVERSIDAD DE CUENCA							
FACULTAD DE INGENIERÍA: ESCUELA DE INGENIERÍA CIVIL							
DOSIFICIÓN ÓPTIMA EN PAVIMENTO FLEXIBLE DE ASFALTO Y CAUCHO UTILIZANDO MATERIALES DE LA REGIÓN							
TAMAÑO DE GRANO DE CAUCHO RECICLADO			FECHA		14/3/2019		
Tamiz #	Abertura [mm]	M1 (Retenido) [g]	Porcentaje Retenido [%]	Porcentaje Pasante [%]	M2 (Retenido) [g]	Porcentaje Retenido [%]	Porcentaje Pasante [%]
4	5.0	0	0	100%	0	0	100.0%
8	2.5	0	0	100%	0	0	100 %
10	2.0	0	0	100%	0	0	100%
16	1.3	60	10.91%	89.09%	18	5.143%	94.86%
30	0.6	364	66.18%	22.91%	230	65.714%	29.14%
50	0.3	108	19.64%	3.27%	92	26.286%	2.86%
100	0.2	14	2.55%	0.73%	10	2.857%	0.000%
200	0.1	3	0.55%	0.18%	0	0.000%	0.000%
	Muestra 1 (g)	550	Muestra 2 (g)	350			

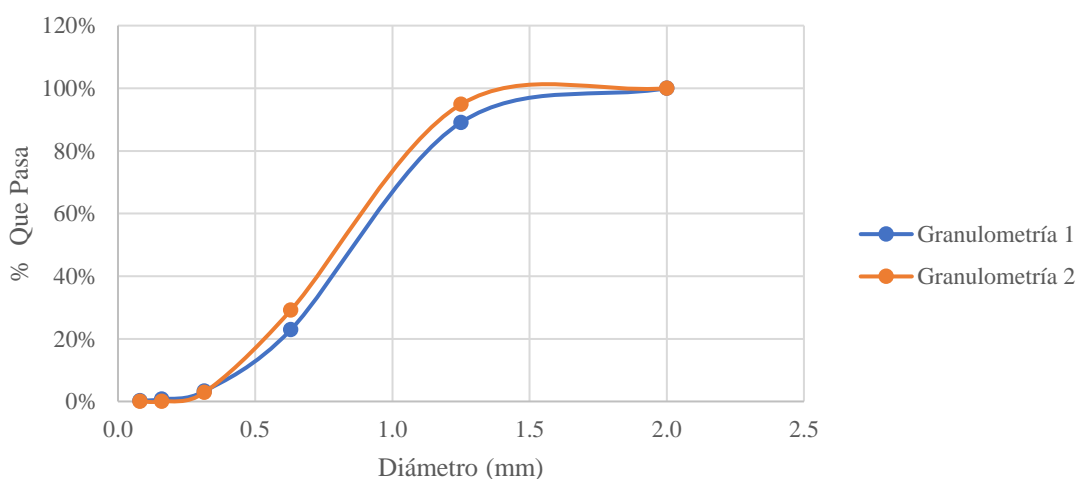


Figura 36. Curva Granulométrica del Grano de Caucho Reciclado.

Para los resultados obtenidos y porcentajes que el material pasa en cada tamiz, según el Instituto Nacional de Vías de Colombia (INVIAS, 2013) se tiene que la granulometría del GCR utilizado corresponde a una de Tipo B, según la Tabla 24 y además cumple con

el requerimiento establecido en la norma NTE INEN 2680:2013 que indica el tamaño de grano de caucho máximo y mínimo al usar en la incorporación en mezclas asfálticas.

## 4.2. Diseño Marshall de Mezclas Asfálticas

Para el diseño de mezclas asfálticas se utilizó el método Marshall, el porcentaje óptimo de asfalto es obtenido a través de los resultados de estabilidad, flujo, peso específico (Bulk), porcentaje de vacíos con aire, vacíos en el agregado mineral y vacíos llenos de asfalto determinados una vez realizadas las pruebas en las muestras patrón y en las muestras modificadas con GCR.

### 4.2.1. Ensayo de Gravedad Específica Teórica Máxima (Gmm)

Para la obtención del Gmm se aplicó el método Rice bajo la norma ASTM D 2041: Standard Test Method for Theoretical Maximum Specific Gravity and Density of Asphalt Mixtures. Los datos y resultados se presentan en la Tabla 25.

Tabla 25. Datos y Resultados. Ensayo RICE.

UNIVERSIDAD DE CUENCA					
FACULTAD DE INGENIERÍA: ESCUELA DE INGENIERÍA CIVIL					
DOSIFICIÓN OPTIMA EN PAVIMENTO FLEXIBLE DE ASFALTO Y CAUCHO UTILIZANDO MATERIALES DE LA REGIÓN					
ENSAYO RICE			FECHA	9/9/2019	
Peso Placa	505	Agua + Recipiente+ Placa de Vidrio	16245		
Peso Recipiente	4314				
Porcentaje De Caucho [%]	Porcentaje De Asfalto [%]	Peso Muestra [g]	Peso Muestra + Agua + Placa [g]	Peso Muestra + Agua + Recipiente + Placa de Vidrio [g]	Gmm (RICE)
0	5	2000.13	13081.80	17395.80	2.355
	5.5	2000.07	13076.70	17390.70	2.341
	6	2000.14	13071.80	17385.80	2.328
	6.5	2000.13	13067.50	17381.50	2.316
	7	2000.05	13057.40	17371.40	2.289
10	5	2000.08	13059.50	17373.50	2.295
	5.5	2000.06	13057.80	17371.80	2.290
	6	2000.02	13053.20	17367.20	2.278
	6.5	2000.22	13045.20	17359.20	2.258
	7	2000.18	13028.90	17342.90	2.217
15	5	2000.19	13073.90	17387.90	2.333
	5.5	2000.02	13050.10	17364.10	2.270
	6	2000.22	13047.10	17361.10	2.262
	6.5	2000.06	13026.00	17340.00	2.210
	7	2000.18	13014.00	17328.00	2.181
20	5	2000.08	13072.90	17386.90	2.331
	5.5	2000.03	13042.00	17356.00	2.250
	6	2000.13	13040.00	17354.00	2.244
	6.5	2000.13	13034.00	17348.00	2.229
	7	2000.00	13029.30	17343.30	2.218

#### 4.2.2. Diseño Marshall: Pavimento Convencional

En la presente sección se presentan los resultados obtenidos en las briquetas después de haberse realizado el ensayo Marshall, en la Tabla 26, se muestran los resultados obtenidos para la muestra patrón.

En la Convencional. Figura, Figura 38. Estabilidad vs. Porcentaje de Asfalto. Muestra Convencional y Figura 39. Porcentaje de Vacíos Totales vs. Porcentaje de Asfalto. Muestra Convencional. se presentan los resultados de los ensayos aplicados a las briquetas de pavimento convencional.


Según la National Asphalt Pavement Association (NAPA) para determinar el porcentaje óptimo de asfalto por el Método Marshall se debe seguir los siguientes pasos:

- En primer lugar, se debe determinar el porcentaje de asfalto que dé la mayor densidad específica (Bulk).
- En segundo lugar, se determina el porcentaje de asfalto que brinda el mayor valor de estabilidad.
- Finalmente, se determina el porcentaje de asfalto que pertenece al valor medio de vacíos totales que establecen las especificaciones o normativas, en el caso de la NEVI, 2012, se requiere un porcentaje igual al 4% de vacíos totales.

En base a ello, el porcentaje óptimo de asfalto será el promedio de los tres porcentajes determinados siempre y cuando se cumplan con todas las normativas establecidas en la región, que se debe verificar.



Tabla 26. Datos y Resultados. Ensayo Marshall de Muestras Convencionales.

UNIVERSIDAD DE CUENCA															
FACULTAD DE INGENIERÍA: ESCUELA DE INGENIERÍA CIVIL															
DOSIFICIÓN ÓPTIMA EN PAVIMENTO FLEXIBLE DE ASFALTO Y CAUCHO UTILIZANDO MATERIALES DE LA REGIÓN															
RESULTADOS ENSAYO MARSHALL: PAVIMENTO CONVENCIONAL									FECHA	16/9/2019					
% Asfalto	5			5.5			6			6.5			7		
Muestra	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3
Espesor [cm]	7.262	7.583	7.443	6.767	6.960	6.925	6.657	6.847	6.688	6.722	6.653	6.540	6.610	6.515	6.498
Diámetro [cm]	10.128	10.133	10.132	10.137	10.129	10.128	10.142	10.128	10.138	10.133	10.123	10.122	10.127	10.123	10.116
Peso Aire [g]	1242.660	1280.810	1243.810	1165.400	1185.800	1182.640	1149.370	1172.420	1169.320	1169.440	1163.780	1140.730	1165.500	1152.840	1148.010
Peso SSS [g]	1245.090	1284.090	1247.920	1165.630	1184.600	1181.630	1150.410	1173.080	1170.430	1170.310	1164.570	1142.160	1166.780	1153.780	1149.510
Peso Agua [g]	668.239	699.733	669.653	617.166	636.484	634.157	626.384	645.320	643.635	639.874	642.091	621.178	640.596	636.283	634.759
Volumen [cm³]	576.851	584.357	578.267	548.464	548.116	547.473	524.026	527.760	526.795	530.436	522.479	520.982	526.184	517.497	514.751
Peso Específico Gmb [Bulk] [g/cm³]	2.154	2.192	2.151	2.125	2.163	2.160	2.193	2.222	2.220	2.205	2.227	2.190	2.215	2.228	2.230
Peso Gmm [RICE]	2.355			2.341			2.327			2.316			2.289		
% Vacíos Totales	8.521	6.924	8.661	9.251	7.603	7.741	5.745	4.535	4.613	4.787	3.805	5.439	3.217	2.662	2.553
% VMA	13.904	12.401	14.035	15.525	13.991	14.120	13.263	12.149	12.221	13.278	12.384	13.872	13.338	12.840	12.743
% VFA	38.713	44.164	38.292	40.414	45.657	45.174	56.681	62.670	62.251	63.949	69.276	60.792	75.878	79.271	79.969
Estabilidad sin Corregir [lbf]	4306.800	4296.300	2198.300	3740.000	3678.000	3514.900	4118.800	4082.700	4317.200	4600.200	4508.100	4611.290	4479.000	4064.000	4420.800
Factor de Corrección	0.815	0.765	0.783	0.907	0.863	0.871	0.930	0.888	0.923	0.916	0.930	0.955	0.941	0.962	0.966
Estabilidad Corregida [lbf]	3508.965	3285.058	1721.681	3391.516	3174.813	3061.839	3828.842	3627.272	3984.288	4211.589	4194.641	4403.515	4216.792	3910.542	4270.309
Flujo [in]	0.258	0.157	0.147	0.132	0.130	0.157	0.152	0.147	0.121	0.129	0.126	0.129	0.137	0.125	0.103
Promedio Gmb [Bulk]	2.166			2.149			2.212			2.207			2.224		
Promedio Vacíos Totales [%]	8.035			8.198			4.965			4.677			2.811		
Promedio VMA [%]	13.447			14.545			12.544			13.178			12.974		
Promedio VFA [%]	40.390			43.748			60.534			64.672			78.373		
Promedio Estabilidad [lbf]	2838.568			3209.389			3813.467			4269.915			4132.547		
Promedio Flujo [in]	0.187			0.140			0.140			0.128			0.122		

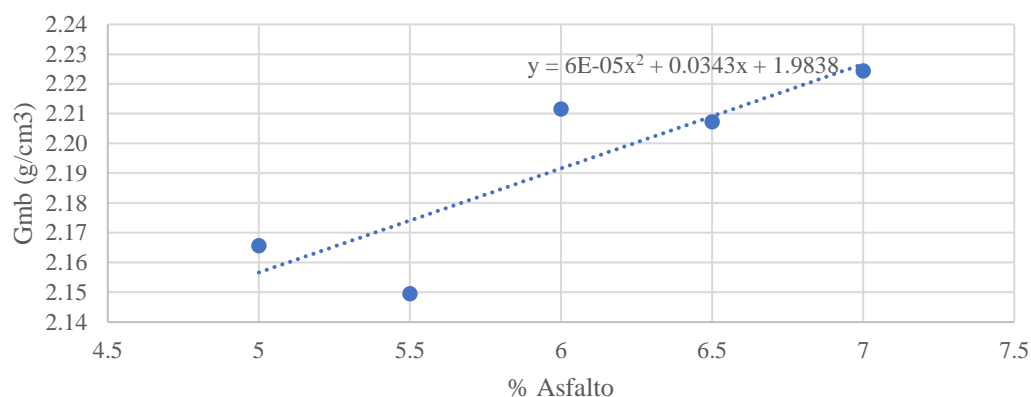


Figura 37. Gmb vs. Porcentaje de Asfalto. Muestra Convencional.

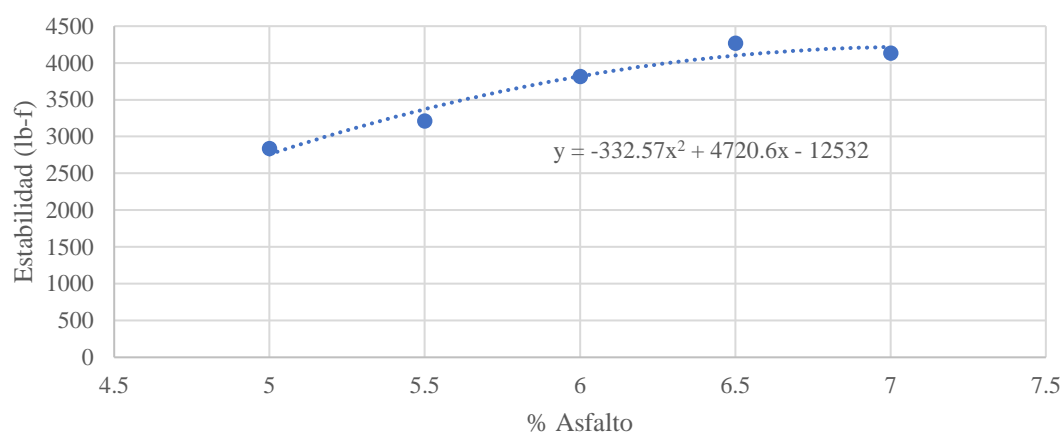


Figura 38. Estabilidad vs. Porcentaje de Asfalto. Muestra Convencional

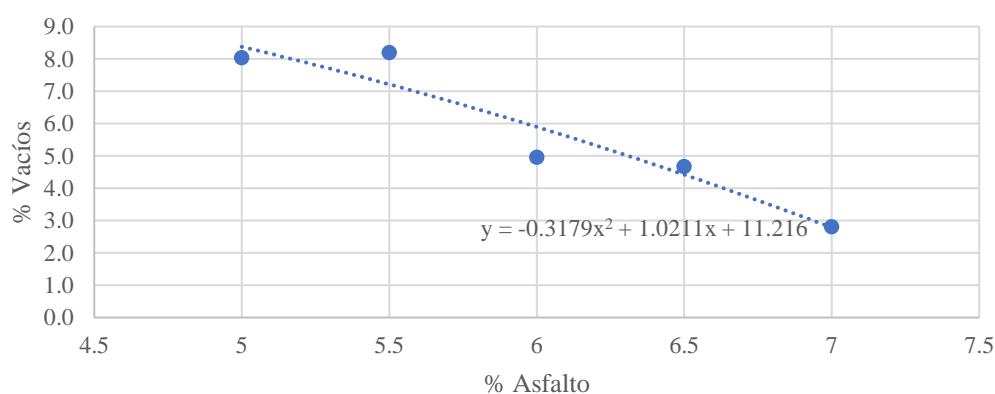


Figura 39. Porcentaje de Vacíos Totales vs. Porcentaje de Asfalto. Muestra Convencional.

Para la muestra de pavimento convencional se tiene que la máxima densidad específica se da con porcentaje de asfalto de 7%, el mayor valor de estabilidad se da con un

porcentaje de asfalto de 6.62% y el 4% de porcentaje de vacíos se consigue con un porcentaje de 6.77%.

Teniendo como resultado un porcentaje óptimo de asfalto para la muestra convencional de 6.7%.

Para este porcentaje se determinan teóricamente los requisitos que establece la NEVI, 2012, en la Tabla 27.

*Tabla 27. Parámetros de Porcentaje Óptimo. Mezcla Convencional.*

Comprobación del porcentaje de asfalto de 6.70%		
Parámetro	Valor	Especificación
Estabilidad (lbf)	4166.25	2200 lb Mín
Flujo (1/100'')	12.35	8 – 14
Vacíos con Aire (%)	3.38	3 – 5 %
Vacíos con Agregado Mineral (%)	13.01	13 % Mín
Vacíos Llenos de Asfalto (%)	74.16	65 – 75

#### **4.2.3. Diseño Marshall: Pavimento Modificado con GCR**

En la presente sección se presentan los resultados obtenidos en las briquetas después de haberse realizado el ensayo Marshall, en la Tabla 28. Datos y Resultados. Ensayo Marshall de Muestras Modificadas con un 10% de GCR., Tabla 30. Datos y Resultados. Ensayo Marshall de Muestras Modificadas con un 15% de GCR. , Tabla 32. Datos y Resultados. Ensayo Marshall de Muestras Modificadas con un 20% de GCR. , se muestran los resultados de las muestras modificadas con GCR.

En la Figura 40. Estabilidad vs. Porcentaje de Asfalto. 10% de GCR., Figura 41.Gmb vs. Porcentaje de Asfalto. 10% de GCR. y Figura 42. Porcentaje de Vacíos Totales vs. Porcentaje de Asfalto. 10% de GCR. las curvas para muestras modificadas con 10% de GCR,

En la Figura 43. Estabilidad vs. Porcentaje de Asfalto. 15% de GCR., Figura 44.Gmb vs. Porcentaje de Asfalto. 15% de GCR., y Figura 45.Porcentaje de Vacíos Totales vs. Porcentaje de Asfalto. 15% de GCR. las curvas para muestras modificadas con 15% de GCR y en la Figura 46. Estabilidad vs. Porcentaje de Asfalto. 20% de GCR, Figura 47. Gmb vs. Porcentaje de Asfalto. 20% de GCR y Figura 48. Porcentaje de Vacíos Totales vs. Porcentaje de Asfalto. 20% de GCR las curvas correspondientes a las muestras modificadas con un 20% de GCR.


Según la National Asphalt Pavement Asociation (NAPA) para determinar el porcentaje óptimo de asfalto por el Método Marshall se debe seguir los siguientes pasos:

- En primer lugar, se debe determinar el porcentaje de asfalto que de la mayor densidad específica (Bulk).
- En segundo lugar, se determina el porcentaje de asfalto que brinda el mayor valor de estabilidad.
- Finalmente se determina el porcentaje de asfalto que pertenece al valor medio de vacíos totales que establecen las especificaciones o normativas, en el caso de la NEVI, 2012, se requiere un porcentaje igual al 4% de vacíos totales.



Entonces el porcentaje óptimo de asfalto será el promedio de los tres porcentajes determinados, siempre y cuando se cumplan con todas las normativas establecidas en la región, que se debe verificar.

Tabla 28. Datos y Resultados. Ensayo Marshall de Muestras Modificadas con un 10% de GCR.

UNIVERSIDAD DE CUENCA															
FACULTAD DE INGENIERÍA: ESCUELA DE INGENIERÍA CIVIL															
DOSIFICIÓN OPTIMA EN PAVIMENTO FLEXIBLE DE ASFALTO Y CAUCHO UTILIZANDO MATERIALES DE LA REGIÓN															
RESULTADOS ENSAYO MARSHALL: PAVIMENTO MODIFICADO CON 10% DE GCR										FECHA		16/9/2019			
% Asfalto	5			5.5			6			6.5			7		
Muestra	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3
Espesor [cm]	7.223	7.033	6.943	6.853	6.913	7.330	6.863	7.177	7.260	7.032	6.798	6.900	7.032	7.052	7.020
Diámetro [cm]	10.138	10.150	10.152	10.143	10.151	10.140	10.121	10.139	10.127	10.138	10.140	10.131	10.127	10.148	10.119
Peso Aire [g]	1183.400	1161.390	1161.420	1151.820	1155.870	1174.850	1154.560	1184.590	1174.650	1162.530	1156.610	1164.730	1183.120	1181.020	1189.800
Peso SSS [g]	1184.320	1163.850	1163.450	1153.680	1157.470	1177.440	1155.580	1185.990	1175.730	1165.560	1158.340	1166.440	1184.920	1182.780	1190.580
Peso Agua [g]	615.256	608.164	610.555	609.551	611.961	621.344	613.619	630.545	618.310	619.927	616.783	623.132	624.005	618.109	630.364
Volumen [cm³]	569.064	555.686	552.895	544.129	545.509	556.096	541.961	555.445	557.420	545.633	541.557	543.308	560.915	564.671	560.216
Peso Específico Gmb [Bulk] [g/cm³]	2.080	2.090	2.101	2.117	2.119	2.113	2.130	2.133	2.107	2.131	2.136	2.144	2.109	2.092	2.124
Peso Gmm [Rice]	2.295			2.290			2.278			2.258			2.217		
% Vacíos Totales	9.388	8.933	8.471	7.545	7.454	7.726	6.471	6.368	7.483	5.630	5.404	5.047	4.849	5.650	4.192
% VMA	16.888	16.470	16.046	15.844	15.762	16.009	15.754	15.662	16.666	16.192	15.991	15.674	17.475	18.169	16.906
% VFA	44.407	45.763	47.210	52.380	52.705	51.740	58.926	59.340	55.102	65.232	66.209	67.803	72.252	68.905	75.201
Estabilidad sin Corregir [lbf]	3055.800	2717.700	3876.000	3646.100	3293.700	1752.700	4341.700	3179.000	2657.400	3241.800	3877.300	3803.000	4024.000	3483.900	4107.000
Factor de Corrección	0.821	0.856	0.872	0.889	0.878	0.801	0.887	0.829	0.814	0.856	0.899	0.880	0.856	0.852	0.858
Estabilidad Corregida [lbf]	2507.320	2325.270	3380.740	3240.820	2891.093	1403.475	3851.083	2635.414	2162.269	2774.290	3485.706	3347.269	3443.686	2968.607	3523.819
Flujo [in]	0.177	0.205	0.213	0.181	0.162	0.246	0.180	0.113	0.151	0.142	0.124	0.115	0.161	0.202	0.118
Promedio Gmb [Bulk] [g/cm³]	2.090			2.116			2.123			2.137			2.108		
Promedio Vacíos Totales [%]	8.931			7.575			6.774			5.360			4.897		
Promedio VMA [%]	16.468			15.871			16.027			15.952			17.517		
Promedio VFA [%]	45.794			52.275			57.789			66.414			72.119		
Promedio Estabilidad [lbf]	2737.777			2511.796			2882.922			3202.421			3312.037		
Promedio Flujo [in]	0.198			0.196			0.148			0.127			0.160		

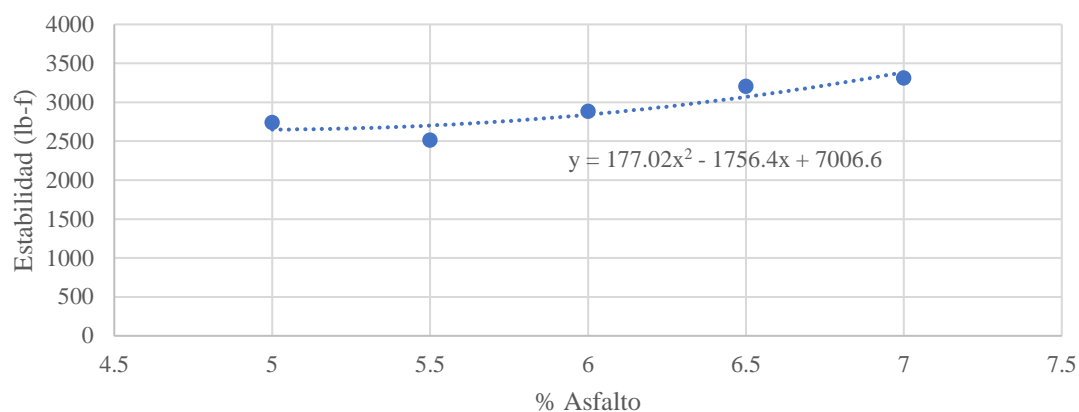


Figura 40. Estabilidad vs. Porcentaje de Asfalto. 10% de GCR.

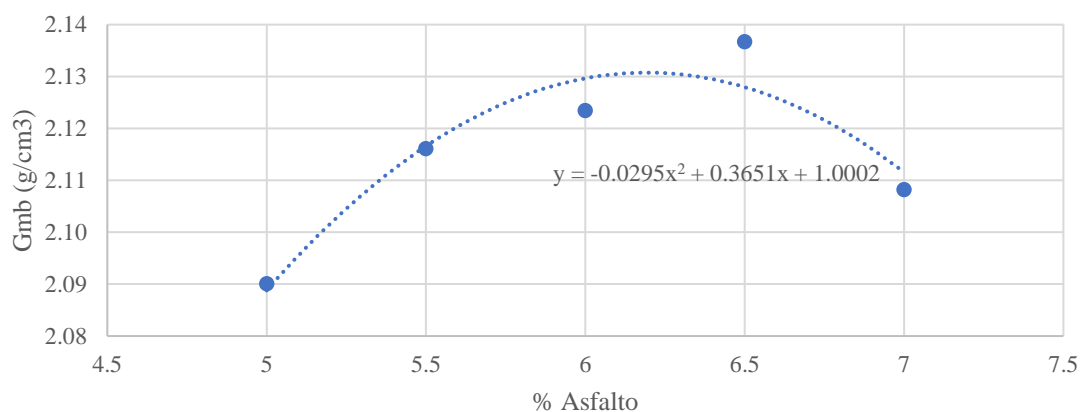


Figura 41. Gmb vs. Porcentaje de Asfalto. 10% de GCR.

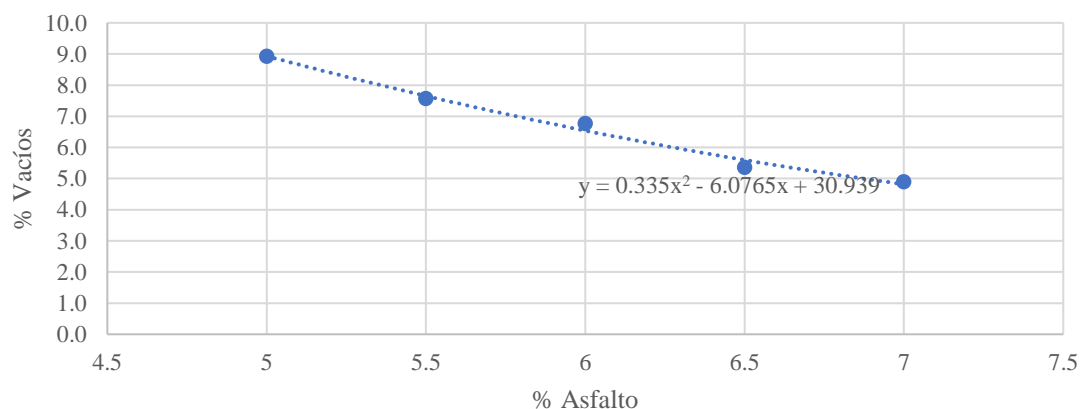


Figura 42. Porcentaje de Vacíos Totales vs. Porcentaje de Asfalto. 10% de GCR.

Para la muestra de pavimento modificado con un 10% de GCR se tiene que la máxima densidad específica se da con porcentaje de asfalto de 6.188%, el mayor valor de



estabilidad se da con un porcentaje de asfalto de 7% y el 4% de porcentaje de vacíos se consigue con un porcentaje de 7%.


Teniendo como resultado un porcentaje óptimo de asfalto para la muestra modificada con un 10% de GCR de 6.72%.

Para este porcentaje se comprueban de igual manera teóricamente los requisitos que establece la NEVI, 2012, en la Tabla 29.

*Tabla 29. Parámetros de Porcentaje Óptimo. Mezcla Modificada con 10% de GCR.*

Comprobación del porcentaje de asfalto de 6.72%		
Parámetro	Valor	Especificación
Estabilidad (lbf)	3197.53	2200 lb Mín
Flujo (1/100'')	14.53	8 – 14
Vacíos con Aire (%)	5.23	3 – 5 %
Vacíos con Agregado Mineral (%)	16.70	13 % Mín
Vacíos Llenos de Asfalto (%)	68.25	65 – 75

Tabla 30. Datos y Resultados. Ensayo Marshall de Muestras Modificadas con un 15% de GCR.

UNIVERSIDAD DE CUENCA															
FACULTAD DE INGENIERÍA: ESCUELA DE INGENIERÍA CIVIL															
DOSIFICIÓN OPTIMA EN PAVIMENTO FLEXIBLE DE ASFALTO Y CAUCHO UTILIZANDO MATERIALES DE LA REGIÓN															
RESULTADOS ENSAYO MARSHALL: PAVIMENTO MODIFICADO CON 15% DE GCR									FECHA	16/9/2019					
% Asfalto	5			5.5			6			6.5			7		
Muestra	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3
Espesor [cm]	10.148	10.152	10.155	10.145	10.136	10.132	10.148	10.153	10.138	10.133	10.118	10.142	10.130	10.123	10.125
Diámetro [cm]	1155.140	1133.970	1143.360	1185.520	1175.590	1171.550	1170.540	1171.700	1181.500	1155.020	1157.120	1156.200	1168.640	1170.960	1176.150
Peso Aire [g]	1157.980	1135.600	1144.320	1186.700	1177.090	1172.490	1171.960	1173.000	1182.470	1155.650	1157.550	1157.150	1169.360	1176.360	1177.840
Peso SSS [g]	586.540	585.470	590.000	614.740	613.920	611.480	614.630	611.310	619.930	607.190	603.370	608.040	616.450	618.710	624.890
Peso Agua [g]	568.801	547.495	551.665	569.194	560.407	558.258	554.564	558.939	559.750	545.728	551.465	546.374	550.136	554.866	550.138
Volumen [cm³]	2.031	2.071	2.073	2.083	2.098	2.099	2.111	2.096	2.111	2.116	2.098	2.116	2.124	2.110	2.138
Peso Específico Gmb [Bulk] [g/cm³]	2.333			2.270			2.262			2.210			2.181		
Peso Gmm [Rice]	2.564			2.494			2.486			2.429			2.397		
% Vacíos Totales	12.961	11.231	11.172	8.228	7.570	7.533	6.698	7.336	6.697	4.249	5.073	4.264	2.613	3.251	1.987
% VMA	18.835	17.222	17.167	17.196	16.602	16.569	16.529	17.101	16.529	16.748	17.464	16.761	16.888	17.433	16.354
% VFA	31.188	34.787	34.921	52.153	54.405	54.536	59.480	57.099	59.484	74.631	70.954	74.559	84.528	81.349	87.847
Estabilidad sin Corregir [lbf]	1649.400	2527.800	2649.100	4469.000	4269.200	4394.000	4458.800	4514.600	3807.900	4386.800	3313.400	3146.000	4138.900	3818.800	3450.900
Factor de Corrección	0.827	0.856	0.874	0.835	0.846	0.854	0.869	0.858	0.840	0.883	0.887	0.890	0.872	0.856	0.874
Estabilidad Corregida [lbf]	1363.727	2164.238	2315.415	3730.288	3611.180	3754.483	3874.952	3874.591	3199.397	3872.662	2940.433	2798.901	3610.449	3268.903	3015.034
Flujo [in]	0.153	0.184	0.182	0.168	0.130	0.163	0.134	0.167	0.104	0.136	0.112	0.119	0.113	0.167	0.139
Promedio Gmb [Bulk] [g/cm³]	2.058			2.093			2.106			2.110			2.124		
Promedio Vacíos Totales [%]	11.788			7.777			6.910			4.529			2.617		
Promedio VMA [%]	17.741			16.789			16.720			16.991			16.892		
Promedio VFA [%]	33.632			53.698			58.688			73.381			84.575		
Promedio Estabilidad [lbf]	1947.793			3698.650			3649.647			3203.998			3298.129		
Promedio Flujo [in]	0.173			0.154			0.135			0.122			0.140		

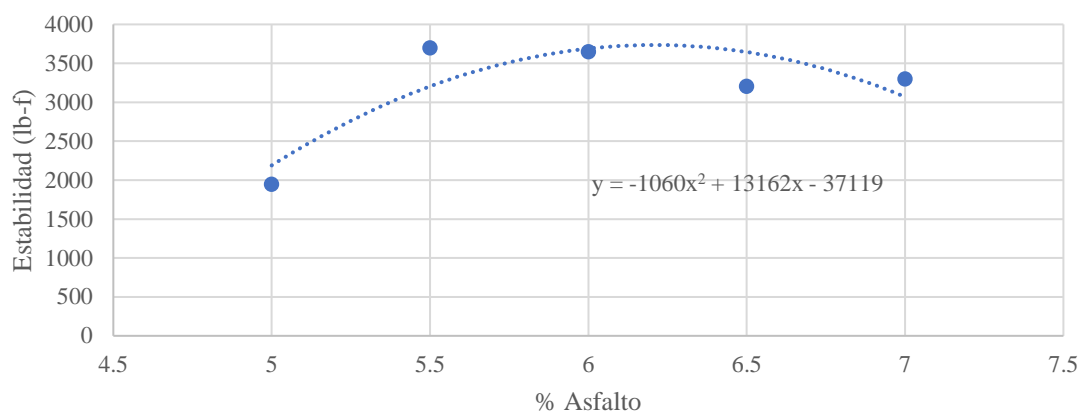


Figura 43. Estabilidad vs. Porcentaje de Asfalto. 15% de GCR.

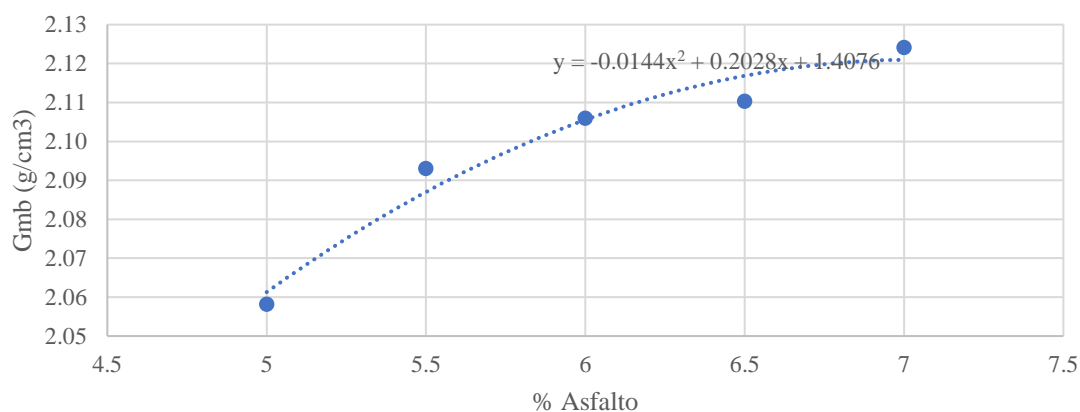


Figura 44. Gmb vs. Porcentaje de Asfalto. 15% de GCR.

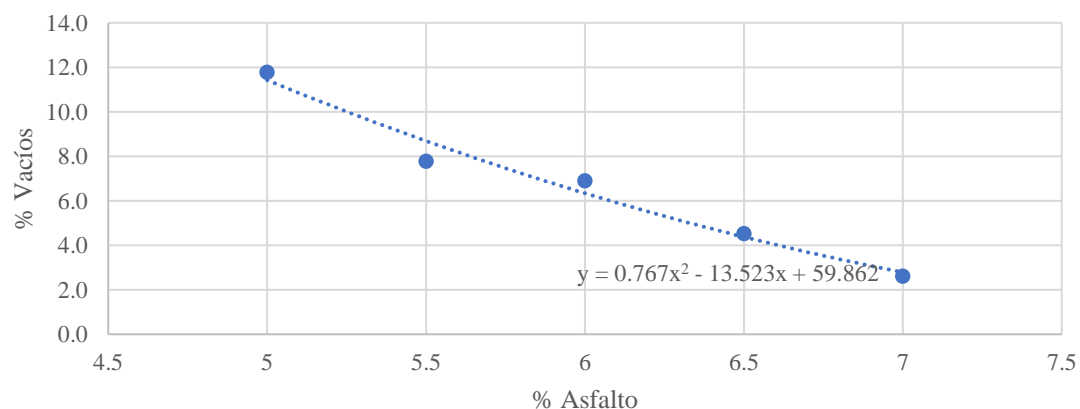


Figura 45. Porcentaje de Vacíos Totales vs. Porcentaje de Asfalto. 15% de GCR.

Para la muestra de pavimento modificado con un 15% de GCR se tiene que la máxima densidad específica se da con porcentaje de asfalto de 7%, el mayor valor de estabilidad

se da con un porcentaje de asfalto de 6.208% y el 4% de porcentaje de vacíos se consigue con un porcentaje de 6.555%.


Teniendo como resultado un porcentaje óptimo de asfalto para la muestra modificada con un 15% de GCR de 6.56%.

Para este porcentaje se comprueban teóricamente los requisitos que establece la NEVI, 2012. en la Tabla 31

*Tabla 31. Parámetros de Porcentaje Óptimo. Mezcla Modificada con 15% de GCR.*

Comprobación del porcentaje de asfalto de 6.56%		
Parámetro	Valor	Especificación
Estabilidad (lbf)	3608.10	2200 lb Mín
Flujo (1/100'')	12.40	8 – 14
Vacíos con Aire (%)	3.98	3 – 5 %
Vacíos con Agregado Mineral (%)	16.71	13 % Mín
Vacíos Llenos de Asfalto (%)	74.83	65 – 75

Tabla 32. Datos y Resultados. Ensayo Marshall de Muestras Modificadas con un 20% de GCR.

UNIVERSIDAD DE CUENCA															
FACULTAD DE INGENIERÍA: ESCUELA DE INGENIERÍA CIVIL															
DOSIFICIÓN OPTIMA EN PAVIMENTO FLEXIBLE DE ASFALTO Y CAUCHO UTILIZANDO MATERIALES DE LA REGIÓN															
RESULTADOS ENSAYO MARSHALL: PAVIMENTO MODIFICADO CON 20% DE GCR										FECHA		16/9/2019			
% Asfalto	5			5.5			6			6.5			7		
Muestra	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3
Espesor [cm]	7.292	7.233	7.143	7.203	7.080	7.163	7.063	7.113	7.152	6.953	6.853	6.792	7.040	6.840	7.048
Diámetro [cm]	10.120	10.141	10.126	10.120	10.123	10.118	10.131	10.127	10.123	10.131	10.127	10.116	10.131	10.118	10.121
Peso Aire [g]	1191.190	1182.060	1158.770	1184.700	1175.390	1180.780	1179.840	1184.420	1184.140	1172.230	1153.790	1148.730	1178.740	1167.150	1185.770
Peso SSS [g]	1192.130	1183.230	1159.840	1185.700	1176.200	1181.630	1180.700	1185.420	1184.950	1173.360	1154.450	1149.430	1179.980	1167.620	1187.350
Peso Agua [g]	615.236	605.603	595.568	619.556	613.860	616.140	616.200	620.771	620.429	616.884	609.912	608.797	628.978	621.705	627.099
Volumen [cm³]	576.894	577.627	564.272	566.144	562.340	565.490	564.500	564.649	564.521	556.476	544.538	540.633	551.002	545.915	560.251
Peso Específico Gmb [Bulk] [g/cm³]	2.065	2.046	2.054	2.093	2.090	2.088	2.090	2.098	2.098	2.107	2.119	2.125	2.139	2.138	2.116
Peso Gmm [Rice]	2.331			2.250			2.244			2.229			2.218		
% Vacíos Totales	11.400	12.191	11.883	6.977	7.083	7.177	6.862	6.526	6.526	5.477	4.924	4.658	3.535	3.594	4.562
% VMA	17.476	18.213	17.926	16.808	16.903	16.987	17.347	17.048	17.049	17.139	16.655	16.421	16.301	16.352	17.192
% VFA	34.769	33.065	33.710	58.490	58.093	57.748	60.441	61.723	61.719	68.042	70.432	71.635	78.312	78.022	73.464
Estabilidad sin Corregir [lbf]	2562.300	2666.100	2982.300	3587.900	4394.300	3429.100	3113.500	3590.300	3161.800	3619.000	3880.900	4095.000	3339.100	4605.100	3126.600
Factor de Corrección	0.805	0.816	0.834	0.822	0.846	0.830	0.849	0.839	0.832	0.870	0.889	0.901	0.853	0.892	0.852
Estabilidad Corregida [lbf]	2063.109	2176.728	2487.238	2949.884	3716.110	2845.518	2643.090	3013.568	2630.351	3148.242	3450.191	3688.235	2849.271	4105.451	2663.167
Flujo [in]	0.142	0.107	0.119	0.156	0.173	0.115	0.140	0.135	0.152	0.165	0.133	0.107	0.136	0.122	0.098
Promedio Gmb [Bulk] [g/cm³]	2.055			2.090			2.095			2.117			2.131		
Promedio Vacíos Totales [%]	11.825			7.079			6.638			5.020			3.897		
Promedio VMA [%]	17.872			16.899			17.148			16.738			16.615		
Promedio VFA [%]	33.848			58.111			61.294			70.036			76.599		
Promedio Estabilidad [lbf]	2242.358			3170.504			2762.336			3428.889			3205.963		
Promedio Flujo [in]	0.123			0.148			0.142			0.135			0.119		

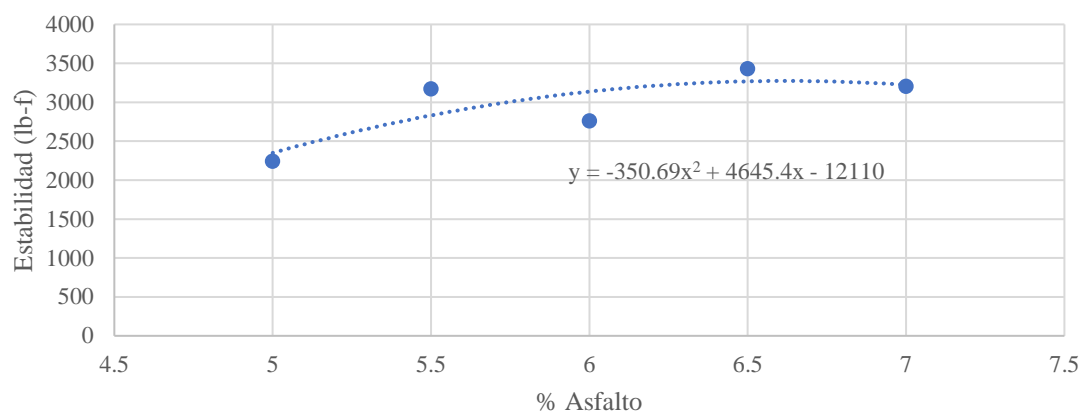


Figura 46. Estabilidad vs. Porcentaje de Asfalto. 20% de GCR

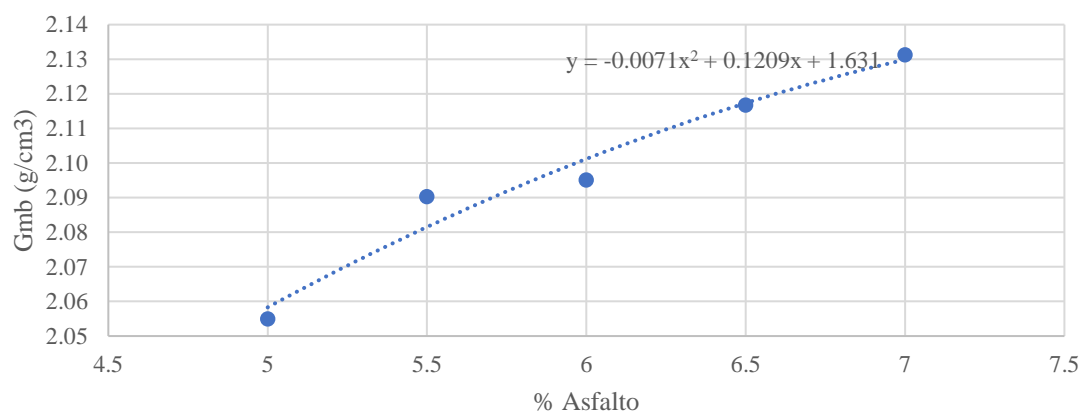


Figura 47. Gmb vs. Porcentaje de Asfalto. 20% de GCR

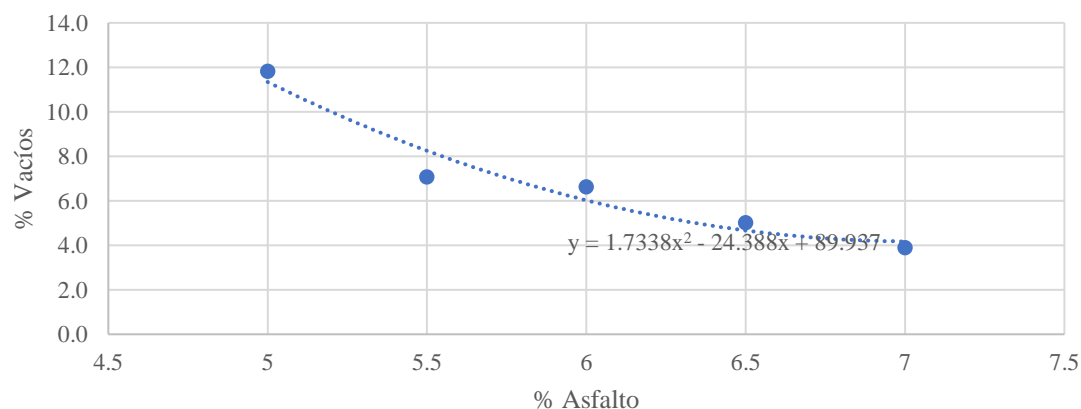


Figura 48. Porcentaje de Vacíos Totales vs. Porcentaje de Asfalto. 20% de GCR

Para la muestra de pavimento modificado con un 20% de GCR se tiene que la máxima densidad específica se da con porcentaje de asfalto de 7%, el mayor valor de estabilidad



se da con un porcentaje de asfalto de 6.623% y el 4% de porcentaje de vacíos se consigue con un porcentaje de 6.77%.

Teniendo como resultado un porcentaje óptimo de asfalto para la muestra modificada con un 20% de GCR de 6.79%.

Para este porcentaje se comprueban teóricamente los requisitos que establece la NEVI, 2012. en la Tabla 33.

*Tabla 33. Parámetros de Porcentaje Óptimo. Mezcla Modificada con 20% de GCR.*

Comprobación del porcentaje de asfalto de 6.79%		
Parámetro	Valor	Especificación
Estabilidad (lbf)	3263.67	2200 lb Mín
Flujo (1/100'')	12.61	8 – 14
Vacíos con Aire (%)	3.97	3 – 5 %
Vacíos con Agregado Mineral (%)	16.66	13 % Mín
Vacíos Llenos de Asfalto (%)	74.34	65 – 75

Tomando en cuenta los resultados obtenidos entre los diferentes porcentajes de GCR utilizados, se determinó que el porcentaje óptimo de caucho y asfalto para los áridos empleados es de 15% de GCR, tomando en cuenta que cumplen con todos los requisitos que establece la NEVI, 2012 y además es el porcentaje que menos cantidad de betún asfáltico utiliza.

### 4.3. Ensayo de Abrasión

Para la determinación del valor de la pérdida por desgaste de las mezclas bituminosas, empleando la Máquina de los Ángeles se empleó la norma española NLT-352/86: Caracterización de las mezclas bituminosas abiertas por medio del ensayo cántabro de pérdida por desgaste, los resultados se presentan en la Tabla 34

Tabla 34. Datos y Resultados. Ensayo de Abrasión de Muestras.

UNIVERSIDAD DE CUENCA						
FACULTAD DE INGENIERÍA: ESCUELA DE INGENIERÍA CIVIL						
DOSIFICIÓN OPTIMA EN PAVIMENTO FLEXIBLE DE ASFALTO Y CAUCHO UTILIZANDO MATERIALES DE LA REGIÓN						
ENSAYO DE ABRASIÓN			FECHA	27/9/2019		
Porcentaje de Caucho	Porcentaje de Asfalto	N° de Muestra	Peso Inicial [g]	Peso Final [g]	Abrasión [%]	Abrasión Promedio [%]
			1	2	3 = (1-2) / 1	
0	6.7	1	1150.68	1082.58	5.92%	7.49%
		2	1193.7	1046.12	12.36%	
		3	1170.86	1127.85	3.67%	
		4	1185.23	1090.2	8.02%	
15	6.56	1	1191.75	997.26	16.32%	15.89%
		2	1188.5	1000.57	15.81%	
		3	1183.25	1002.85	15.25%	
		4	1175.26	985.26	16.17%	

Para los porcentajes de asfalto utilizado tanto en la muestra convencional, como en las muestras con adición de GCR, las mezclas presentan un desgaste por abrasión inferior al máximo especificado por INVÍAS, 2013 de 25 % para cualquier temperatura de mezcla utilizada (Instituto Nacional de Vías, 2013).

### 4.4. Análisis de Precios Unitario

Se realizó un análisis comparativo de costos entre el pavimento convencional y el pavimento modificado con GCR con el fin de determinar una relación costo-beneficio que tendría en obra. Se consideraron los aspectos más importantes para la ejecución de trabajos de pavimentación como: El equipo y maquinaria a emplearse, los materiales constitutivos de la obra y la mano de obra requerida para la ejecución de la misma.

Para la determinación de las cantidades de material en las mezclas, se tomó en cuenta el porcentaje óptimo de asfalto obtenido en los ensayos Marshall que son de 6.7% de asfalto para el pavimento convencional y de 6.56 % de asfalto para el pavimento modificado con el 15 % de GCR. La unidad de medida que se va a emplear es el metro cúbico (m<sup>3</sup>).

En la Tabla 35 y Tabla 36 se presenta el análisis de precios unitarios para un pavimento convencional, mientras que en la Tabla 37 y Tabla 38 se presenta el análisis de precios unitarios para un pavimento modificado con GCR. El precio del caucho fue dado por ISOLLANTA S.A. y el del asfalto por ASFALTAR E.P; los demás rubros se obtuvieron de la lista de precios de la Contraloría General del Estado.

Tabla 35. Análisis de Precios Unitarios: Mezcla Asfáltica Producida en Planta-Asfalto Convencional.

UNIVERSIDAD DE CUENCA						
FACULTAD DE INGENIERÍA: ESCUELA DE INGENIERÍA CIVIL						
DOSIFICIÓN OPTIMA EN PAVIMENTO FLEXIBLE DE ASFALTO Y CAUCHO UTILIZANDO MATERIALES DE LA REGIÓN						
ANÁLISIS DE PRECIOS UNITARIOS: ASFALTO PRODUCIDO EN PLANTA-ASFALTO CONVENCIONAL						
EQUIPOS Y HERRAMIENTAS						
Código	Descripción	Unidad	Cantidad	Precio	Rendimiento	Total
A1	Planta de Asfalto	Hora	1.00	120.00	0.50	60.00
A2	Cargadora Frontal	Hora	1.00	35.00	0.50	17.50
A3	Volqueta	Hora	1.00	30.00	0.50	15.00
Subtotal de Equipos y Herramientas:						92.50
MATERIALES						
Código	Descripción	Unidad	Cantidad	Precio		Total
B1	Grava	m³	0.32	20.00		6.40
B2	Arena	m³	0.59	20.00		11.80
B3	Polvo	m³	0.02	25.00		0.58
B4	Betún Asfáltico AC-20	m³	0.07	367.27		24.61
Subtotal de Materiales:						43.28
MANO DE OBRA						
Código	Descripción	Unidad	Cantidad	Precio	Rendimiento	Total
C1	Chofer Maquinaria	hh	2.00	5.26	0.50	5.26
C2	Operador Planta Asfalto	hh	1.00	5.26	0.50	2.63
Subtotal de Mano de Obra:						7.89
Costo Directo Total:						143.77

Tabla 36. Análisis de Precios Unitarios: Mezcla Asfáltica Puesto en Obra-Asfalto Convencional.

UNIVERSIDAD DE CUENCA						
FACULTAD DE INGENIERÍA: ESCUELA DE INGENIERÍA CIVIL						
DOSIFICIÓN OPTIMA EN PAVIMENTO FLEXIBLE DE ASFALTO Y CAUCHO UTILIZANDO MATERIALES DE LA REGIÓN						
ANÁLISIS DE PRECIOS UNITARIOS: ASFALTO PUESTO EN OBRA-ASFALTO CONVENCIONAL						
EQUIPOS Y HERRAMIENTAS						
Código	Descripción		Cantidad	Precio	Rendimiento	Total
A1	Herramientas Manuales		1.00	0.40	0.03	0.01
A2	Volqueta		1.00	30.00	0.03	0.75
A3	Terminadora Asfáltica		1.00	50.00	0.03	1.25
A4	Rodillo Liso Vibratorio		1.00	40.00	0.03	1.00
A5	Rodillo Neumático		1.00	40.00	0.03	1.00
Subtotal de Equipos y Herramientas:						4.01
MANO DE OBRA						
Código	Descripción	Unidad	Cantidad	Precio	Rendimiento	Total
B1	Residente	hh	1.00	4.03	0.03	0.10

<b>B2</b>	Capataz	hh	1.00	4.01	0.03	0.10
<b>B3</b>	Peón	hh	6.00	3.58	0.03	0.54
<b>B4</b>	Operador Terminadora Asfáltica	hh	1.00	3.82	0.03	0.10
<b>B5</b>	Ayudante de Maquinaria	hh	1.00	3.82	0.03	0.10
<b>B6</b>	Operador Rodillo	hh	2.00	3.82	0.03	0.19
<b>B7</b>	Chofer Volqueta	hh	1.00	5.26	0.03	0.13
Subtotal de Mano de Obra:						1.25
<b>MATERIALES</b>						
<b>Código</b>	<b>Descripción</b>	<b>Unidad</b>	<b>Cantidad</b>	<b>Precio</b>		<b>Total</b>
<b>C1</b>	Carpeta Asfáltica	m <sup>3</sup>	1.30	143.77		186.90
Subtotal de Materiales:						186.90
<b>Costo Directo Total:</b>						<b>192.17</b>
<b>Costos Indirectos (20%)</b>						<b>230.60</b>

Tabla 37. Análisis de Precios Unitarios: Mezcla Asfáltica Producido en Planta-Asfalto Modificado con GCR.


UNIVERSIDAD DE CUENCA						
FACULTAD DE INGENIERÍA: ESCUELA DE INGENIERÍA CIVIL						
DOSIFICIÓN OPTIMA EN PAVIMENTO FLEXIBLE DE ASFALTO Y CAUCHO UTILIZANDO MATERIALES DE LA REGIÓN						
ANÁLISIS DE PRECIOS UNITARIOS: ASFALTO PRODUCIDO EN PLANTA- ASFALTO MODIFICADO CON GCR						
EQUIPOS Y HERRAMIENTAS						
Código	Descripción	Unidad	Cantidad	Precio	Rendimiento	Total
A1	Planta de Asfalto	Hora	1.00	120.00	0.50	60.00
A2	Cargadora Frontal	Hora	1.00	35.00	0.50	17.50
A3	Volqueta	Hora	1.00	30.00	0.50	15.00
Subtotal de Equipos y Herramientas:						92.50
MATERIALES						
Código	Descripción	Unidad	Cantidad	Precio		Total
B1	Grava	m³	0.32	20.00		6.40
B2	Arena	m³	0.59	20.00		11.80
B3	Polvo	m³	0.02	25.00		0.61
B4	Betún Asfáltico AC-20	m³	0.06	367.27		20.48
B5	Polvo de Caucho	kg	10.04	0.35		3.51
Subtotal de Materiales:						42.80
MANO DE OBRA						
Código	Descripción	Unidad	Cantidad	Precio	Rendimiento	Total
C1	Chofer Maquinaria	hh	2.00	5.26	0.50	5.26
C2	Operador Planta Asfalto	hh	1.00	5.26	0.50	2.63
Subtotal de Mano de Obra:						7.89
Costo Directo Total:						143.19

Tabla 38. Análisis de Precios Unitarios: Mezcla Asfáltica Puesta en Obra-Asfalto Modificado con GCR.

UNIVERSIDAD DE CUENCA						
FACULTAD DE INGENIERÍA: ESCUELA DE INGENIERÍA CIVIL						
DOSIFICACIÓN OPTIMA EN PAVIMENTO FLEXIBLE DE ASFALTO Y CAUCHO						
UTILIZANDO MATERIALES DE LA REGIÓN						
ANÁLISIS DE PRECIOS UNITARIOS: ASFALTO PUESTO EN OBRA-ASFALTO MODIFICADO CON GCR						
EQUIPOS Y HERRAMIENTAS						
Código	Descripción		Cantidad	Precio	Rendimiento	Total
A1	Herramientas Manuales		1.00	0.40	0.03	0.01
A2	Volqueta		1.00	30.00	0.03	0.75
A3	Terminadora Asfáltica		1.00	50.00	0.03	1.25
A4	Rodillo Liso Vibratorio		1.00	40.00	0.03	1.00
A5	Rodillo Neumático		1.00	40.00	0.03	1.00
Subtotal de Equipos y Herramientas:						4.01
MANO DE OBRA						
Código	Descripción	Unidad	Cantidad	Precio	Rendimiento	Total
B1	Residente	hh	1.00	4.03	0.03	0.10
B2	Capataz	hh	1.00	4.01	0.03	0.10
B3	Peón	hh	6.00	3.58	0.03	0.54
B4	Operador Terminadora Asfáltica	hh	1.00	3.82	0.03	0.10
B5	Ayudante de Maquinaria	hh	1.00	3.82	0.03	0.10
B6	Operador Rodillo	hh	2.00	3.82	0.03	0.19
B7	Chofer Volqueta	hh	1.00	5.26	0.03	0.13
Subtotal de Mano de Obras:						1.25
MATERIALES						
Código	Descripción	Unidad	Cantidad	Precio		Total
C1	Carpeta Asfáltica	m <sup>3</sup>	1.30	143.19		186.15
Subtotal de Materiales:						186.15
<b>Costo Directo Total:</b>						<b>191.41</b>
<b>Costos Indirectos (20%)</b>						<b>229.70</b>

Con la finalidad de establecer un ejemplo práctico y para una mejor comprensión, se establecieron datos para la construcción de una vía y se obtuvo el precio que tendría la carpeta asfáltica en obra para los dos casos: pavimento convencional y pavimento modificado con GCR. Los datos impuestos y los resultados de costo se presentan en la Tabla 39.

Tabla 39. Comparación de Precios. Mezcla Asfáltica Convencional – Mezcla Asfáltica Modificado con GCR.

Descripción	Valor	Unidad
Longitud de vía	1000	m
Ancho de carril	3.60	m
Número de carriles	2	-
Espesor de la carpeta asfáltica	3	in
Precio carpeta asfáltica convencional	166,032.00	USD/km
Precio carpeta asfáltica modificada con GCR	165,384.00	USD/km

Basado en los datos que muestra la Tabla 39, se observa que el precio por kilómetro de vía al usar una mezcla asfáltica modificada con polvo de caucho disminuye en un 0.4%. A pesar de que la diferencia no sea significativa en el ámbito económico, se tiene que tomar en cuenta el aporte medioambiental y la sustentabilidad de la obra será mayor debido al uso del polvo de caucho como método de reciclaje de neumáticos usados.

## Conclusiones y Recomendaciones

El objetivo del presente estudio se enfoca en la dosificación óptima de asfalto y caucho en pavimento flexible usando los materiales de la región, en base a los ensayos de laboratorio y análisis se concluye que:

### **Conclusiones**

- Los materiales utilizados, es decir: áridos, betún y caucho, cumplen las normas especificadas en la Norma Ecuatoriana de Vialidad (NEVI-12), Instituto de Vías (INVÍAS 2013) y el Instituto Ecuatoriano de Normalización (INEN). En el caso de los áridos y basándose en la NEVI-12, características como su tamaño de grano y desgaste se encuentran dentro de los parámetros establecidos, su manga granulométrica se encuentra en los límites aptos para áridos a usar en una mezcla Marshall y su porcentaje de abrasión es de 19.65% menor al 40% que establece como límite la norma antes mencionada.
- En base de los ensayos de laboratorio antes mencionados y utilizando cinco diferentes porcentajes de asfalto se determina que el porcentaje óptimo de contenido de asfalto para una mezcla asfáltica convencional es del 6.70%. Teniendo un valor de estabilidad de 4166.25 lbf, un flujo de 12.35 1/100", un 3.38% de vacíos con aire, 13.01% de vacíos con agregado mineral y 74.16% de vacíos llenos de asfalto. Cumpliéndose así con los requerimientos establecidos en la NEVI-12.
- El porcentaje óptimo de contenido de asfalto para una mezcla asfáltica modificado con el 10% de polvo de caucho con respecto al peso del betún es del 6.72%. Teniendo un valor de estabilidad de 3197.53 lbf, un flujo de 14.53 1/100", un 5.23% de vacíos con aire, 16.70% de vacíos con agregado mineral y 68.25% de vacíos llenos de asfalto. En este caso los valores obtenidos no cumplen con los requerimientos establecidos en la NEVI-12 para las propiedades de flujo (máximo 14 1/100") y vacíos con aire (máximo 5%).
- El porcentaje óptimo de contenido de asfalto para una mezcla asfáltica modificado con el 15% de polvo de caucho con respecto al peso del betún es del 6.56%. Teniendo un valor de estabilidad de 3608.10 lbf, un flujo de 12.40 1/100", un 3.98% de vacíos con aire, 16.71% de vacíos con agregado mineral y 74.83% de vacíos llenos de asfalto. En este caso los valores obtenidos cumplen con los requerimientos establecidos en la NEVI-12.
- El porcentaje óptimo de contenido de asfalto para una mezcla asfáltica modificado con el 20% de polvo de caucho con respecto al peso del betún es del 6.70%. Teniendo un valor de estabilidad de 3263.67 lbf, un flujo de 12.61 1/100", un 3.97 % de vacíos con aire, 16.66 % de vacíos con agregado mineral y 74.33 % de vacíos llenos de asfalto. En este caso los valores obtenidos cumplen con los requerimientos establecidos en la NEVI-12.
- Basado en los parámetros para cada porcentaje óptimo de betún en las mezclas asfálticas modificadas con polvo de caucho, se determinó que la mezcla asfáltica modificada más conveniente es aquella que contiene un 6.56 % de contenido de asfalto modificado con un 15 % de polvo de caucho con respecto al peso de betún. Debido a que esta mezcla presenta menor cantidad de contenido de asfalto y sus propiedades mecánicas como la estabilidad y el flujo son mejores en comparación con el resto de mezclas asfálticas modificadas con caucho.
- Según el análisis económico realizado, la mezcla asfáltica tradicional tiene un precio de \$143.77 /m<sup>3</sup> producido en planta, mientras que el costo de la mezcla asfáltica



modificada con caucho y la dosificación antes indicada, para la misma cantidad de mezcla tiene un costo de \$ 143.19. Es decir, se redujo el precio de la mezcla debido a la disminución de la cantidad de betún asfáltico que tuvo la mezcla modificada y además la cantidad de polvo de caucho que reemplaza el 15 % del peso del betún modificado total. Al ser ya puesto en obra el precio se reduce en un 0.4% por kilómetro de vía construida con carpeta asfáltica modificada con polvo de caucho.

- La variación entre la mezcla asfáltica convencional y la modificada sucede en el valor de estabilidad, en la mezcla asfáltica convencional este parámetro tiene un valor de 4166.25 lbf es decir mayor que en la modificada que tiene un valor de 3608.10 lbf y los demás parámetros mantienen similitudes entre sí.
- Al considerar el desgaste o la abrasión de la mezcla modificada en comparación a la convencional, los valores de dicha mezcla aumentan de 7.49% a 15.89%, pero se mantienen dentro del rango calificado como aceptable dentro de la normativa vigente del Instituto Nacional de Vías que indica un valor máximo de desgaste del 25%.
- Aunque exista una diferencia entre los valores de los parámetros de cada mezcla (convencional y modificada), aún se mantienen en los rangos calificados como aceptables dentro de la normativa vigente. Por otro lado, el análisis económico indica un menor costo en la mezcla modificada con caucho, esto tiene gran importancia en su aplicación en obra, debido a que el factor económico es uno de los parámetros de mayor consideración para la viabilidad de una obra civil. Sin embargo, se tienen que tomar en cuenta los valores iniciales para la modificación de equipos que servirán para la elaboración de la mezcla modificada.
- Los valores del porcentaje óptimo de betún en cada mezcla asfáltica se asemejan, esto se debe a que la granulometría elegida para cada muestra contiene un alto porcentaje de árido fino (61 % de la mezcla total) por lo que el betún asfáltico debe cubrir una superficie más densa y con mayor porcentaje de absorción, alcanzando así valores cercanos al contenido más alto de asfalto, es decir, el 7%.
- En el análisis económico, se obtuvo que se necesitan aproximadamente 10 kg de GCR por m<sup>3</sup> de mezcla asfáltica modificada bajo la dosificación obtenida. Entonces, se asume que la utilización del caucho en una obra civil es posible, debido a que el material se encuentra disponible y su demanda puede ser cubierta por su proveedor (ISOLLANTA S.A)

## Recomendaciones

- Se recomienda hacer un ensayo de tracción indirecta el cual permite imitar la respuesta de una mezcla asfáltica y obtener la carga máxima que aguanta dicha mezcla antes de romperse, en este estudio no se realizó dicho ensayo debido a la falta de equipos necesarios para su ejecución.
- La inspección del tiempo de digestión en obra es importante para controlar la incorporación del caucho al betún asfáltico (vía húmeda). En el presente trabajo se siguió la normativa otorgada por el Instituto Nacional de Vías (INVIAS-2013) y además el procedimiento descrito para la fabricación de las mezclas en un ambiente controlado como lo es el laboratorio del Centro Tecnológico de la Construcción.
- Se recomienda realizar un estudio económico sobre la utilización de asfaltos modificados con distintos materiales, donde se incluyan los costos iniciales y de mantenimiento, para de esta manera, comparar el beneficio a largo plazo que tiene el usar cada tipo de mezcla.

- Es necesario efectuar ensayos con partículas de caucho de distintos tamaños a la ensayada para determinar si es que los resultados mejoran en comparación a los obtenidos en el presente estudio.
- Con la finalidad de continuar la investigación de la incorporación de GCR en una mezcla asfáltica, es importante realizar ensayos por vía seca, debido a que el caucho en este método actúa como árido fino o grueso dependiendo de su tamaño de grano.

## Referencias

- AASHTO. (2012). AASHTO T 209. *AASHTO T 209:Standard Method for Theoretical Maximum Specific Gravity (G<sub>mm</sub>) and Density of Hot Mix Asphalt (HMA)*. Washington D.C., Estados Unidos: American Association of State Highway and Transportation Officials.
- Arias, D. (2012). Estudio del Impacto Ambiental del Proceso de reencauchado de Neumáticos en la Ciudad de Cuenca. Cuenca, Azuay, Ecuador: Universidad del Azuay.
- Asociación de Productores y Pavimentadores Asfálticos de Colombia. (2004). Cartilla del Pavimento Asfáltico. Bogotá, Colombia: Asociación de Productores y Pavimentadores Asfálticos de Colombia.
- Asphalt Institute. (2001). *Principios de Construcción de Pavimentos de Mezcla Asfáltica en Caliente*. Lexington, Kentucky, USA: Asphalt Institute.
- ASTM. (1989). ASTM D1559. *ASTM D1559-89: Test Method for Resistance of Plastic Flow of Bituminous Mixtures Using Marshall Apparatus (Withdrawn 1998)*. West Conshohocken, Pensilvania, Estados Unidos: American Society for Testing and Materials.
- ASTM. (1997). ASTM D6114. *ASTM D6114-97: A Standard Specification for Asphalt Rubber Binder*. West Conshohocken, Pensilvania, Estados Unidos: American Society for Testing and Materials.
- ASTM. (2010). ASTM C136M. *ASTM C136M-10: Standard Test Method for Sieve Analysis of Fine and Coarse Aggregates*. West Conshohocken, PA., Pensilvania, Estados Unidos: American Society for Testing and Materials.
- ASTM. (2010). ASTM D2216. *ASTM D2216 - 10: Standard Test Methods for Laboratory Determination of Water (Moisture) Content of Soil and Rock by Mass*. West Conshohocken, Pensilvania, Estados Unidos: American Society for Testing and Materials.
- ASTM. (2013). ASTM C70. *ASTM C70-13: Standard Test Method for Surface Moisture in Fine Aggregate*. West Conshohocken, Pensilvania, Estados Unidos: American Society for Testing and Materials.
- ASTM. (2013). ASTM D1561. *ASTM D1561-13: Standard Practice for Preparation of Bituminous Mixture Test Specimens by Means of California Kneading Compactor*. West Conshohocken, Pensilvania, Estados Unidos: American Society for Testing and Materials.
- ASTM. (2014). ASTM D75. *ASTM D75-14: Standard Practice for Sampling Aggregates*. West Conshohocken, Pensilvania, Estados Unidos: American Society for Testing and Materials.
- ASTM. (2015). ASTM C127. *ASTM C127-15: Standard Test Method for Relative Density (Specific Gravity) and Absorption of Coarse Aggregate*. West Conshohocken, Pensilvania, Estados Unidos: American Society for Testing and Materials.

- ASTM. (2015). ASTM C128. *ASTM C128-15: Standard Test Method for Relative Density (Specific Gravity) and Absorption of Fine Aggregate*. West Conshohocken, Pensilvania, Estados Unidos: American Society for Testing and Materials.
- ASTM. (2015). ASTM D1560. *ASTM D1560-15: Standard Test Methods for Resistance to Deformation and Cohesion of Asphalt Mixtures by Means of Hveem Apparatus*. West Conshohocken, Pensilvania, Estados Unidos: American Society for Testing and Materials.
- ASTM. (2016). ASTM D6926. *ASTM D6926-16: Standard Practice for Preparation of Asphalt Mixture Specimens Using Marshall Apparatus*. West Conshohocken, Pensilvania, Estados Unidos: American Society for Testing and Materials.
- ASTM. (2017). ASTM C117. *ASTM C117-17: Standard Test Method for Materials Finer than 75- $\mu$ m (No. 200) Sieve in Mineral Aggregates by Washing*. West Conshohocken, Pensilvania, Estados Unidos: American Society for Testing and Materials.
- ASTM. (2018). ASTM C702. *ASTM C702-18: Standard Practice for Reducing Samples of Aggregate to Testing Size*. West Conshohocken, Pensilvania, Estados Unidos: American Society for Testing and Materials.
- ASTM. (2018). ASTM D6752. *ASTM D6752-18: Standard Test Method for Bulk Specific Gravity and Density of Compacted Asphalt Mixtures Using Automatic Vacuum Sealing Method*. West Conshohocken, Pensilvania, Estados Unidos: American Society for Testing and Materials.
- ASTM. (2019). ASTM D2041. *ASTM D2041-19: Standard Test Method for Theoretical Maximum Specific Gravity and Density of Asphalt Mixtures*. West Conshohocken, Pennsylvania, Estados Unidos: American Society for Testing and Materials.
- Blanco, F., & Montañez, J. (2016). *Análisis del Comportamiento Físico-En Mezclas Asfálticas MDC-19 Modificado con Sodio y Glucosa*. Bogotá, Colombia: Universidad Católica de Colombia.
- BRIDGESTONE. (2010, Julio 02). *Bridgestone do Brasil. Fabricante de Pneus*. Retrieved from [http://www.pneuseguro.com.br/index.asp?page=partes\\_do\\_pneu](http://www.pneuseguro.com.br/index.asp?page=partes_do_pneu)
- Carpio, X., & Medina, R. (2013, Septiembre). *Diseño de una Línea de Procesado para la Obtención de Polvo de Caucho a Base de Neumáticos Fuera de Uso*. Cuenca, Azuay, Ecuador: Universidad Politécnica Salesiana.
- CEDEX. (2000). NLT-352. *NLT-352/86: Caracterización de las Mezclas Bituminosas Abiertas por medio del Ensayo Cántabro de Pérdida por Desgaste*. Madrid, España: Centro de Estudios y Experimentación de Obras Públicas.
- CEDEX. (2007). *Manual de Empleo de Caucho de NFU en Mezclas Bituminosas*. Madrid, España: CEDEX.
- Cervera, C. (2016). *Influencia en las Propiedades Mecánicas de una Mezcla asfáltica Incorporando Caucho Reciclado de Neumáticos*, Cajamarca, 2016. Cajamarca, Peru: Universidad Privada del Norte.

- Chaluiza, Á. (2012). Relaciones de Compresión y Tensión en Adoquines Fabricados con Materiales Procedentes de la Cantera de Pesillo, Ubicada en el Cantón Cayambe, Provincia de Pichincha. Quito, Pichincha, Ecuador: Universidad Central del Ecuador.
- Chimborazo, W. (2012). Diseño de Mezclas Asfálticas Mediante el Método SUPERPAVE. Cuenca, Ecuador: Universidad de Cuenca.
- Chuquimarca, E. (2019, Mayo 05). *ESPECIAL: Ecuador Contribuye a Medioambiente con Productos Elaborados con Llantas Recicladas*. Retrieved from spanish.preople.cn: <http://spanish.people.com.cn/n3/2019/0505/c31618-9574855.html>
- COGUANOR. (2014, Junio 20). Norma Técnica Guatemalteca. *NTG 41010 h20: Método de ensayo. Determinación de la resistencia al desgaste, del agregado grueso de tamaño hasta de 37.5 mm (1½ pulg), por abrasión e impacto en la Máquina de Los Ángeles*. Ciudad de Guatemala, Guatemala: COGUANOR.
- Construmática. (n.d.). *Deformación Marshall*. Retrieved from Construmática: [https://www.construmatica.com/construpedia/Deformaci%C3%B3n\\_Marshall](https://www.construmatica.com/construpedia/Deformaci%C3%B3n_Marshall)
- Construmática. (n.d.). *Ensayo Marshall*. Retrieved from Construmática: [https://www.construmatica.com/construpedia/Ensayo\\_Marshall](https://www.construmatica.com/construpedia/Ensayo_Marshall)
- Construmática. (n.d.). *Estabilidad Marshall*. Retrieved from Construmática: [https://www.construmatica.com/construpedia/Estabilidad\\_Marshall](https://www.construmatica.com/construpedia/Estabilidad_Marshall)
- Das, B. (2013). *Fundamentos de Ingeniería Geotécnica*. México D.F.: Cengage Learning.
- El Universo. (2018, Junio 06). 2,4 millones de neumáticos se desechan cada año en Ecuador. *El Universo*.
- Fajardo, L., & Vergaray, D. (2014). Efecto de la Incorporación por Vía Seca, del Polvo de Neumático Reciclado como Agregado Fino en Mezclas Asfálticas. Lima, Perú.
- Flores, C., & Vásquez, M. (2017). Relación de las Propiedades Marshall de Estabilidad y Flujo de una Mezcla Asfáltica en Caliente, Durante su Colocación y Posterior a la Misma. Cuenca, Ecuador: Universidad de Cuenca.
- Garnica, P., Delgado, H., Gómez, J., Alonso, S., & Alarcón, H. (2004). Aspectos del Diseño Volumétrico de Mezclas Asfálticas. Safandila, Querétaro, México: Instituto Mexicano del Transporte.
- Heitzman, M. (1993). Design and Construction of Asphalt Paving Materials with Crumb Rubber Modifier. *Transportation Research Record*, 1-8.
- Hernández, G., & Ramírez, F. (2016). Análisis de la Influencia del Grado de Compactación de una Mezcla Asfáltica en su Deformación Permanente y la Susceptibilidad a la Humedad. Bogotá, Colombia: Universidad Católica de Colombia.
- Ingeniero Civil Info. (2011, Junio 11). *Tamaño de Partículas y Graduación de los Agregados*. Retrieved from Ingeniería Civil: Proyectos y apuntes teórico-prácticos de Ingeniería Civil para compartir con ustedes.: <https://www.ingenierocivilinfo.com/2011/06/tamano-de-particulas-y-graduacion-de.html>

- Instituto Ecuatoriano de Normalización. (2010). Norma Técnica Ecuatoriana. *NTE INTEN 2515:2010: Productos Derivados del Petróleo. Cemento Asfáltico (Clasificación por Viscosidad). Requisitos*. Quito, Ecuador: Instituto Ecuatoriano de Normalización.
- Instituto Ecuatoriano de Normalización. (2013). Norma Técnica Ecuatoriana. *NTE INEN 2680:2013: Productos Derivados del Petróleo. Asfalto Modificado con Caucho Reciclado. Requisitos e Inspección*. Quito, Pichincha, Ecuador: Instituto Ecuatoriano de Normalización.
- Instituto Ecuatoriano de Normalización. (2014). Norma Técnica Ecuatoriana. Quito, Ecuador: Instituto Ecuatoriano de Normalización.
- Instituto Ecuatoriano de Vialidad. (2012). Norma Ecuatoriana de Vialidad. Ecuador.
- Instituto Nacional de Normalización (Chile). (2012). Norma Chilena de Normalización. *Mezcla Asfáltica- Polvo de Caucho Proveniente de los Neumáticos Fuera de Uso-Requisitos*. Santiago de Chile, Chile: Instituto Nacional de Normalización (Chile).
- Instituto Nacional de Vías. (2013). Especificaciones Generales de Construcción de Carreteras y Normas de Ensayo para Materiales de Carreteras. Bogotá D.C, Colombia: Instituto Nacional de Vías.
- Isan, A. (2017, noviembre 21). *Los Neumáticos, Grandes Contaminantes*. Retrieved from Ecología Verde: [https://www.ecologiaverde.com/los-neumaticos-grandes-contaminantes-419.html#anchor\\_1](https://www.ecologiaverde.com/los-neumaticos-grandes-contaminantes-419.html#anchor_1)
- Martin, R., & Wallace, H. A. (1962). *Pavimentos Asfálticos. Proyecto y Construcción*. Madrid: Aguilar.
- Mata, M. (2010, Septiembre). Guía Básica para la Conformación de Bases y Subbases para Carreteras en el Salvador. San Salvador, El Salvador: Universidad del El Salvador.
- Montejo Fonseca, A. (1998). *Ingeniería de Pavimentos. Evaluación estructural, Obras de Mejoramiento y Nuevas Tecnologías*. Bogotá: Universidad Católica de Colombia.
- Montejo, A. (1997). *Ingeniería de Pavimentos para Carreteras*.
- NAPA. (1996). Hot Mix Asphalt Materials, Mixture Design And Construction. Second Edition. Lanham, Estados Unidos: National Asphalt Pavement Association Research and Education Foundation.
- Navarro, N. (2013). Confección y Seguimiento de Tramos de Prueba de Mezclas Asfálticas con Incorporación de Polvo de Caucho Nacional de Neumáticos Fuera de Uso (NFU) Mediante Vía Seca. Santiago de Chile, Chile: Universidad de Chile.
- Peralta, K. (2016, Marzo). Pavimentos. *Asfalto. Diseño*. Porlamar, Venezuela: Instituto Universitario Politécnico "Santiago Mariño".
- PETROECUADOR S.A. (2019). *INFORME DE RESULTADOS: ASFALTO AC-20*. Esmeraldas.
- Portafolio. (2010, Julio 16). *Las Imparables Ruedas de la Contaminación*. Retrieved from Portafolio: <https://www.portafolio.co/economia/finanzas/imparables-ruedas-contaminacion-437016>



- Prasad, D., & Prasada, G. (2009). Performance of Waste Tyre Rubber. *ARPN Journal of Engineering and Applied Sciences*.
- Rondón, H., & Reyes, r. (2015). *Pavimentos. Materiales, Construcción y Diseño*. Bogotá: MACRO.
- Salmanca, D. (2018, Mayo). Estudio Comparativo Del Comportamiento De Mezcla Asfáltica Con Incorporación De Polvo De Caucho Nacional, Mediante Vía Seca, Versus Mezcla Con Asfalto Modificado Con Polímeros Y Asfalto Multigrado. Tramo De Prueba: Catapilco-La Laguna (Tesis). Valparaíso, Chile.
- Sistema Integrado de Gestión de Neumáticos Usados. (2014). Guía para la Fabricación de Betunes con Polvo de Neumático. Madrid, España: Sistema Integrado de Gestión de Neumáticos Usados.
- Universidad Centroamericana "José Simeón Cañas". (n.d.). Laboratorio de: Materiales de Construcción. *Densidad, Densidad Relativa y Absorción del Agregado Fino*. San Salvador, El Salvador: UNIVERSIDAD CENTROAMERICANA "José Simeón Cañas" UCA.
- Universidad de Piura. (s.f). Materiales Que Conformen una Mezcla Asfáltica. Piura, Perú: Universidad de Piura.
- Universidad Mayor de San Simón: Facultad de Ciencias y Tecnología. (2004). *Pavimentos*. Cochabamba: UMSS.
- Universidad Técnica Nacional. (n.d.). Pavimentos. *Pavimentos*. Rosario, Argentina: Universidad Técnica Nacional: Facultad Regional Rosario.
- Varun, A. A., & Prakash, S. (2018, Enero 18). Crumb Rubber As Asphalt Modifier. *International Journal Of Advanced Research*, 865-868.
- Vega, D. (2016). Análisis del Comportamiento a Compresión de Asfalto Conformado por Caucho Reciclado de Llantas como Material Constitutivo del Pavimento Asfáltico. Ambato, Ecuador.
- Verdezoto, C. (2016). Elaboración de una Mezcla para Carpeta de Rodadura de Pavimento Flexible con Cemento Asfáltico Modificado Utilizando Polvo de Caucho. Guayaquil, Guayas, Ecuador: Universidad de Guayaquil.



## Anexos



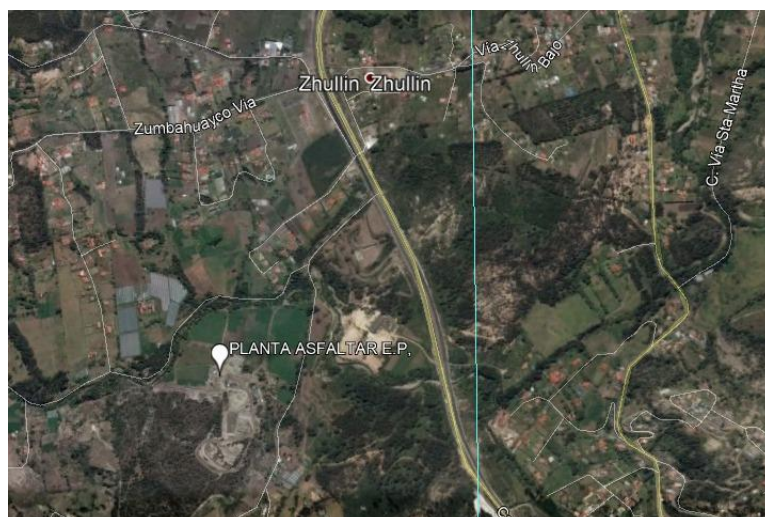
*Anexo 1. Cantera Rookaazul.*



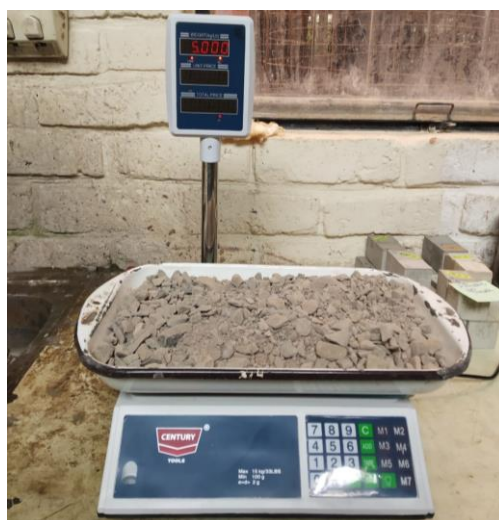
*Anexo 2. Ubicación: Cantera Rookaazul.*



*Anexo 3. Planta ASFALTAR EP. Fuente: ASFALTAR EP*



*Anexo 4. Ubicación: Planta ASFALTAR EP.*

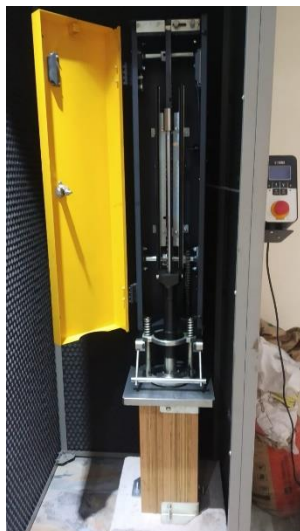


*Anexo 5. Pesaje del agregado.*

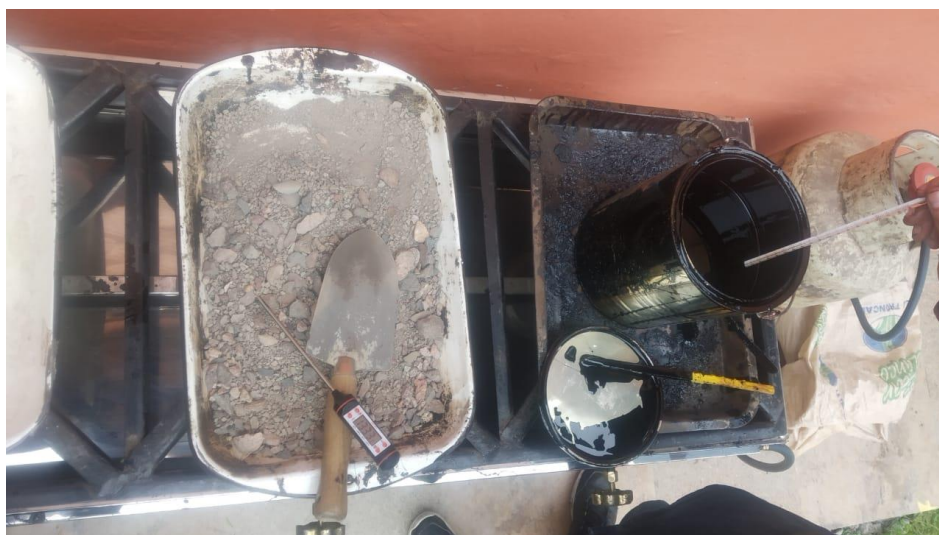


*Anexo 6. Clasificación del árido por tamaño de partícula.*





*Anexo 7. Martillo Marshall.*



*Anexo 8. Calentamiento del Betún y los Agregados.*



*Anexo 9. Preparación de la mezcla asfáltica y calentamiento del molde.*



*Anexo 10. Briquetas fabricadas con asfalto convencional.*



*Anexo 11. Polvo de Caucho.*



*Anexo 12. Modificación de asfalto con GCR.*



*Anexo 13. Briquetas de pavimento modificado con GCR.*



*Anexo 14. Cepillado de muestras.*

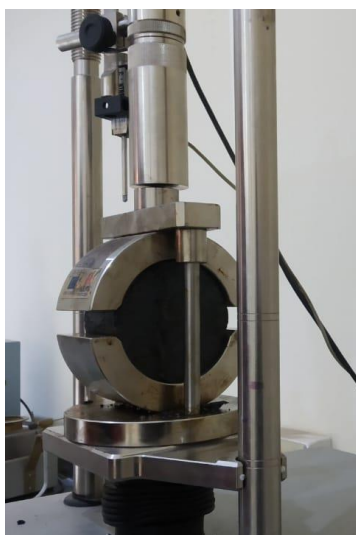


*Anexo 15. Pesaje de muestras.*





*Anexo 16. Equipo MULTISPEED para ensayo Marshall de Estabilidad y Flujo.*



*Anexo 17. Briqueta colocada en molde para ensayo.*



*Anexo 18. Realización de ensayo Marshall de Estabilidad y Flujo.*



*Anexo 19. Esquipo Baño María.*



*Anexo 20. Briquetas puestas en Baño María.*



*Anexo 21. Briqueta posterior al ensayo Marshall de Estabilidad y Flujo.*





*Anexo 22. Briqueta posterior al Ensayo de Abrasión.*



*Anexo 23. Picnómetro de ensayo Rice.*

EP - PETROECUADOR  
INFORME DE RESULTADOS



Laboratorio de ensayo acreditado por el SAE con  
ACREDITACIÓN No. SAE LEN 13-002

GERENCIA: GERENCIA DE REFINACIÓN REFERENCIA: PROGRAMA DE TRANSFERENCIA # 241  
ORGANIZACIÓN: M01\_REFINERÍA ESMERALDAS PRODUCTO ANALIZADO: 0280 ASFALTO AC-20  
NÚMERO NO.: M01-0798-2019 CÓDIGO MUESTRA: ECC-18-1463

DATOS CLIENTE	
NOMBRE	JEFE DE CONTROL Y PROGRAMACIÓN DE LA PRODUCCIÓN (ING. ALEJANDRO CAMACHO Y.)
DIRECCIÓN	Km 7 1/2 Antigua Vía Atacames.
TÉLEFONO	062994000 (80004)
SOL CITADO POR	ING. MAURICIO GAVILANES ESPECIALISTA DE CONTROL Y PROGRAMACIÓN DE LA PRODUCCIÓN

DATOS DE LA MUESTRA	
ORIGEN DE LA MUESTRA	AO-V18
FECHA DE TOMA DE MUESTRA	2019/08/29
CANTIDAD DE MUESTRA	2000 ml
FECHA DE RECEPCIÓN DE MUESTRA	2019/08/29
LUGAR TOMA DE MUESTRA	SETRIA
HORA TOMA DE MUESTRA	17:00:39
HORA DE RECEPCIÓN DE MUESTRA	17:05:57
PUNTO DE MUESTREO	AFORE DE TANQUE

DATOS DE ANÁLISIS	
TEMPERATURA AMBIENTE	24.0 °C
UMEDAD RELATIVA AMBIENTE	66.0 %HR
FECHA DE INICIO DE LOS ENSAYOS	2019/08/29 17:10:59
FECHA DE EMISIÓN DEL INFORME	2019/08/30
PRESIÓN BAROMÉTRICA	101.6 kPa
FECHA FINALIZACIÓN DE LOS ENSAYOS	2019/08/29 23:30:39

RESULTADOS							
PARÁMETRO	MÉTODO		ESPECIFICACIÓN <sup>(1)</sup>		RESULTADO	UNIDAD DE MEDIDA	U <sup>(2)</sup>
	(ASTM, INEN)	INTERNO	MIN.	MAX.			
VISCOSIDAD ABSOLUTA 140 °F (60 °C)	ASTM D2171, NTE INEN 810	V03.06.01.03-T-22	160	240	208,0	Pa.s	±4.0%
VISCOSIDAD CINEMÁTICA 275 °F (135 °C)	ASTM D2170, NTE INEN 810/1581	V03.06.01.03-T-23	300	-	368,0	mm <sup>2</sup> /s	±1.9%
PENETRACIÓN 77 °F (25 °C 100 G, 5s)	ASTM D5, NTE INEN 918	V03.06.01.03-T-20	60	-	79	0.1mm	±4.0mm
PUNTO DE INFLAMACIÓN	ASTM D92, NTE INEN 808	V03.06.01.03-T-21	232	-	300	°C	±N/A
SOLUBILIDAD EN TRICLOROETILENO <sup>(3)</sup>	ASTM D2042, NTE INEN 915	V03.06.01.03-T-31	99	-	99.94	%P	-
RESIDUO DE ENSAYOS DE PELÍCULA FINA EN HORIO ROTATORIO <sup>(4)</sup>	N/A	V03.06.01.03-T-30	N/A	N/A	N/A	-	-
VISCOSIDAD 60°C	ASTM D2171, NTE INEN 810	V03.06.01.03-T-22	-	800	638,0	Pa.s	±N/A
DUCTILIDAD 77 °F (25 °C) 5mm/min <sup>(5)</sup>	ASTM D113, NTE INEN 916	V03.06.01.03-T-24	50	-	65,0	cm	-
GRAVEDAD API A 60 °F (15.6 °C)	ASTM D1298, NTE INEN 2319	V03.06.01.03-T-04	REPORTE	REPORTE	7,2	°API	±N/A
GRAVEDAD RELATIVA (15.6/15.8 °C)	ASTM D1298, NTE INEN 2319	V03.06.01.03-T-04	REPORTE	REPORTE	1,0202	-	±N/A
GRAVEDAD ESPECÍFICA 25/25 °C	ASTM D36	V03.06.01.03-T-57	REPORTE	REPORTE	1,010	-	±0.002
PUNTO DE ABANDAMIENTO <sup>(6)</sup>	ASTM D36	-	-	-	48,5	°C	-
TÍPO DE PENETRACIÓN <sup>(7)</sup>	ASTM D5	-	-1.5	-1	-0,4	-	-
CAMBIO DE MASA <sup>(8)</sup>	ASTM D2872	V03.06.01.03-T-30	-	-1	-0,210	%P	-
API OBSERVADO: 14.620	-	-	-	-	-	-	-
TEMPERATURA OBSERVADA: 94.0°C	-	-	-	-	-	-	-
OBSERVACIONES:							

FIRMAS DE RESPONSABILIDAD

AUTORIZADO POR: DR. EDGAR CAMPOS REYES LASTRA  
JEFE DE LABORATORIO Y CONTROL DE CALIDAD

CONTROLADO POR: ING. VICTORIA NARVAEZ  
DELEGADA EN JEFE

NOTAS: INFORMACIÓN PROPORCIONADA POR EL CLIENTE NO APLICA.  
1. Los resultados de este informe corresponden únicamente a las propiedades de la muestra analizada en el laboratorio.  
2. Los resultados se aplican únicamente a la muestra como se recibió.  
3. Si la aprobación del Especialista y/o Jefe de Control de Calidad, no se deberá reproducir el informe, excepto cuando se reproduce en su totalidad.  
4. Los ensayos marcados con (\*) NO están dentro del alcance de la acreditación del SAE.  
5. Los resultados de los ensayos realizados a la muestra son de responsabilidad del Laboratorio RE, excepto si la información es suministrada por el cliente y esta afecta la validez de los resultados.  
6. El 10 se detallará en observaciones.  
7. Referido a la Norma INEN NTE 2515 2014 Enmienda 1.  
8. La U es estimación multiplicando la U típica por el factor de cobertura k=2 (95% nivel de confianza).

Dirección Organización: Km 7 1/2 VÍA ATACAMES SRN - teléfono: (593)06 2994000 - extensiones: 85450 - 85455 - 85457 - 85453 - ESMERALDAS ECUADOR

Página 1 de 1

Formato: V03.06.01.03-FO-300(V04-2018-08-11)

Anexo 24. Informe de Resultados. Ensayo Betún AC-20.